

Kernwaffenrelevante Materialien und präventive Rüstungskontrolle: uranfreie Brennstoffe zur Plutoniumbeseitigung und Spallationsneutronenquellen

Liebert, Wolfgang; Englert, Matthias; Pistner, Christoph

Veröffentlichungsversion / Published Version

Forschungsbericht / research report

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:

SSG Sozialwissenschaften, USB Köln

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Liebert, W., Englert, M., & Pistner, C. (2009). Kernwaffenrelevante Materialien und präventive Rüstungskontrolle: uranfreie Brennstoffe zur Plutoniumbeseitigung und Spallationsneutronenquellen. (Forschung DSF, 20). Osnabrück: Deutsche Stiftung Friedensforschung. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-260428>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Kernwaffenrelevante Materialien und Präventive Rüstungskontrolle: Uranfreie Brennstoffe zur Plutoniumbeseitigung und Spallationsneutronenquellen

Wolfgang Liebert/Matthias Englert/Christoph Pistner

Kontakt:
Deutsche Stiftung Friedensforschung (DSF)
Am Ledenhof 3-5
D-49074 Osnabrück
Fon: +49.(0)541.600.35.42
Fax: +49.(0)541.600.79.039
www.bundesstiftung-friedensforschung.de
info@bundesstiftung-friedensforschung.de

Wolfgang Liebert
liebert@ianus.tu-darmstadt.de
Matthias Englert
englert@ianus.tu-darmstadt.de
Interdisziplinäre Arbeitsgruppe
Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit
Technische Universität Darmstadt
Hochschulstraße 4a, D-64289 Darmstadt
Fon: +49.(0)6151.16.4368,-3016
Fax: +49.(0)6151.16.6039
Internet: <http://www.ianus.tu-darmstadt.de/>

Christoph Pistner
c.pistner@oeko.de
Öko-Institut e.V.
Büro Darmstadt

© 2009 Deutsche Stiftung Friedensforschung
Gestaltung, Satz und Herstellung: atelier-raddatz.de und DSF
Druck: Günter Druck GmbH, Georgsmarienhütte
Alle Rechte vorbehalten.
Printed in Germany 2009

Spendenkonto der Deutschen Stiftung Friedensforschung:
Sparkasse Osnabrück, Konto-Nr. 1230, BLZ 265 501 05

Zusammenfassung.....	4
Abstract	4
1. Einführung in die Thematik.....	14
2. Optionen zur Plutoniumbeseitigung – Untersuchungen zu uranfreien Brennstoffen	20
2.1 Einleitung.....	20
2.2 Bedeutung der Plutoniumbeseitigung für präventive Rüstungskontrolle und die verfolgte Fragestellung.....	22
2.3 Aktuelle Situation im Bereich Plutoniumbestände und Plutoniumumgang.....	24
2.4 Bewertungskriterien für Optionen der Plutoniumbeseitigung und Methodik der Untersuchungen	27
2.5 Ergebnisse der Simulationsrechnungen	28
2.6 Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen	31
3. Wege zur Erhöhung der Proliferationsresistenz von Spallationsneutronenquellen.....	36
3.1 Einleitung.....	36
3.2 Spallationsneutronenquellen (SNQs) und ihr Proliferationspotential	37
3.3 Berechnung von Plutoniumproduktionsraten in Spallationsneutronenquellen und erste Potentialabschätzung.....	41
3.4 Mögliche realistische Szenarien für Produktion von Waffenstoffen	43
3.5 Klassifikation von Produktionsszenarien.....	45
3.6 Zusammenfassung	48
3.7 Empfehlungen und Ausblick	49
4. Beiträge zum Konzept Präventiver Rüstungskontrolle im Nuklearbereich	53
5. Anhänge.....	55
A. Berechnungen zu Uranfreien Brennstoffen (IMF)	55
B. Berechnung der Produktion von Plutonium, Uran-233 und Tritium in Spallationsneutronenquellen	63
C. Spallationsanlagen weltweit und Diskussion von <i>Safeguards</i>	72
6. Literatur.....	76

Forschung DSF erscheint in unregelmäßiger Folge. Für Inhalt und Aussage der Beiträge sind jeweils die Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Zusammenfassung

Die wesentliche technische Hürde für den Zugriff auf Kernwaffen ist heute der Zugang zu ausreichenden Mengen an kernwaffenrelevanten Nuklearmaterialien. Dabei handelt es sich vorrangig um Spaltstoffe (wie hochangereichertes Uran und Plutonium) aber auch um das fusionsfähige Material Tritium. Diese können als Brennstoffe in zivilen Nuklearprogrammen aber ebenso in Kernwaffenprogrammen genutzt werden. Um nukleare Proliferation (die Verbreitung von Kernwaffen) zu verhindern bzw. zu erschweren, bedarf es also nicht allein der Analyse offener oder verdeckter politischer Zielsetzungen und Absichten. Entscheidender ist ebenso die Analyse der intrinsischen zivil-militärischen Ambivalenz von nuklearen Materialien und von Technologien, die zu sensibler Materialproduktion geeignet sind. Für eine weitsichtige Strategie zur Vermeidung von Proliferationsgefahren sollte den technischen Möglichkeiten („capabilities“) weit mehr Beachtung geschenkt werden, als dies bislang in der politischen Debatte über nukleare Nichtverbreitung geschieht. Denn wenn technische Optionen einem Staat einmal zur Verfügung stehen, ist es extrem schwierig und langwierig, dies wieder rückgängig zu machen.

Die Gefahren, auf die reagiert werden muss, gehen von bereits vorliegenden Beständen kernwaffenrelevanter Materialien – sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich – sowie von bereits existierenden oder zukünftigen Technologien aus, die zur Produktion entsprechender Materialien geeignet sind (vgl. Infos 1 und 2). Der übergreifende Ansatz des Projekts besteht daher in der Bemühung um eine drastische Reduzierung der Zugriffsmöglichkeit auf kernwaffenrelevante Materialien unter Einschluss ihrer Produktionsmöglichkeit. Einerseits kann so der nuklearen Proliferation durch Staaten wirksamer begegnet werden, andererseits kann durch diesen Ansatz auch eine entscheidende Hürde gegen den Zugriff substaatlicher Gruppen und Terroristen auf Kernwaffen aufgebaut werden.

Safeguards der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) und weitere physische Schutzmaßnahmen bleiben dabei unverzichtbare Elemente der Rüstungskontrolle. Aber es muss bedacht werden, dass sie das Ziel der nuklearen Nichtverbreitung letztlich nicht erreichen und sicherstellen können und dass mit diesem Ansatz die nukleare Ambivalenzproblematik nicht grundlegend angegangen werden kann. Daher wird in dieser Untersuchung über *Safeguards* hinaus gedacht und es werden weiter gehende Möglichkeiten der Präventiven Rüstungskontrolle und des Konzeptes der Proliferationsresistenz eruiert. Frühzeitig und mit vorbeugender Absicht müssen geeignete Maßnahmen entwickelt und dann auch umgesetzt werden, die möglichst effektiv dem Ziel nuklearer Nichtverbreitung (d. i. Nichtweiterverbreitung und Abrüstung) dienen. Insbesondere werden drei Ansätze als Teil einer Konzeption präventiver Rüstungskontrolle im Nuklearbereich an Hand technologischer Beispiele diskutiert: die Beseitigung von Waffenstoffen, die Antizipation von technologisch bedingten Proliferationsrisiken und die Verbesserung der Proliferationsresistenz.

Der Beseitigungsansatz hat große Bedeutung für die Anstrengung, die Abrüstung irreversibel zu machen. Nukleare Abrüstung ohne Beseitigung der kernwaffenrelevanten Materialien, bei der diese Waffenstoffe zumindest in eine proliferationsresistentere Form überführt werden, bleibt unvollständig und letztlich nicht überzeugend. Diese Notwendigkeit besteht auch in Staaten, die aufgrund ihres Zugriffs auf eine ausreichende Menge und Qualität kernwaffenrelevanter Materialien im Prinzip kernwaffenfähig sind.

Die systematische Bemühung um eine Antizipation von heute bereits absehbaren Gefährdungen durch nukleare Technologien ist aufgrund der wissenschaftlich-technologischen Dynamik notwendiger denn je. Werden neue Gefährdungspotentiale ausreichend früh er-

kannt, besteht noch die Möglichkeit, auf die technologische Entwicklung selbst einzuwirken. Dies führt konsequenter Weise zum Konzept der Proliferationsresistenz.

Beim Ansatz der Proliferationsresistenz sollen technisch-intrinsische Möglichkeiten für die Gestaltung von nuklearen Technologien und Anlagen oder für die physikalische Umwandlung von Waffenstoffen genutzt werden, um eine möglichst große Hürde gegenüber dem denkbaren militärischen Gebrauch zu gewährleisten.

Das Projekt fokussiert auf zwei hochrelevante Problemstellungen im Bereich nuklearer Nichtverbreitung, die im direkten Zusammenhang mit der zentralen Rolle kernwaffenrelevanter Materialien stehen, und versucht dabei, Lösungsansätze auf der technologischen Ebene aufzuzeigen:

- Auslotung von Pfaden zum Abbau vorliegender Bestände kernwaffenrelevanter Materialien am Beispiel einer technischen Option zur Plutoniumbeseitigung: Zentrale technische Fragen zur möglichen Nutzung uranfreier Brennstoffe (*Inert Matrix Fuel - IMF*) in existierenden Leichtwasserreaktoren werden untersucht, um zu klären, welche Vorteile oder Nachteile gegenüber anderen Pfaden zur Plutoniumbeseitigung bestehen. Dabei beschränkt sich die Betrachtung auf einen Vergleich mit reaktorgestützten Optionen, insbesondere die Verwendung von Uran-Plutonium-Mischoxidbrennstoffen (MOX).
- Frühzeitige Analyse der proliferationsrelevanten Potentiale neuer bzw. neuartiger Nukleartechnologien (Zugriffsmöglichkeiten auf Waffenstoffe): Am Beispiel der Spallationsneutronenquellen werden Gestaltungsmöglichkeiten aufgezeigt, die eine Verbesserung der Proliferationsresistenz garantieren können. Bislang existiert keine umfassendere Analyse der Nichtverbreitungsaspekte von Spallationsquellen, obwohl offensichtlich ist, dass sie prinzipiell zur Erbrütung von kernwaffenrelevanten Materialien wie Plutonium, Uran-233 oder Tritium geeignet wären. Diese Lücke wird im Rahmen dieses Projekts geschlossen.

Beide Teilprojekte liefern somit nicht nur Beiträge zu einer Konzeption präventiver Rüstungskontrolle, sondern ebenso zur Technikgestaltung, die am Kriterium der Proliferationsresistenz ausgerichtet ist.

Optionen zur Plutoniumbeseitigung – Untersuchungen zu uranfreien Brennstoffen (IMF)

Sowohl „Waffen-Plutonium“, das speziell für Waffenzwecke produziert wurde, als auch „Reaktor-Plutonium“, das in typischen Leistungsreaktoren anfällt, können grundsätzlich für die Konstruktion von Kernwaffen verwendet werden. Dies gilt insbesondere für Plutonium, das bereits aus abgebranntem Brennstoff durch Wiederaufarbeitung abgetrennt wurde, und für die aus der Abrüstung freigesetzten ehemaligen militärischen Bestände. Beseitigungsstrategien für Plutonium, die die Zugänglichkeit, die Verwendbarkeit oder sogar die Absolutmengen reduzieren, sind eine unbedingte Notwendigkeit, ohne die politisch-institutionelle Überlegungen zur irreversiblen Abrüstung und zur Nichtweiterverbreitung langfristig nicht zielführend erdacht und umgesetzt werden können.

Eine Übersicht der aktuellen Situation im Bereich der vorliegenden Plutoniumbestände und des Plutoniumgangs weltweit zeigt, dass die im zivilen Bereich angefallenen Bestände mittlerweile die Größenordnung der militärischen erreicht haben (jeweils etwa 250 Tonnen, die für 50.000 Sprengköpfe ausreichen würden). Eine knappe Diskussion des Standes der Beseitigungsprogramme für US-amerikanisches und russisches „Waffen-Plutonium“, die seit Mitte der 1990er Jahre angelaufen sind, zeigt, dass weder die Immobilisierungsoption

(insbes. die Verglasung mit radioaktiven Abfällen), die 2002 in den USA auf Eis gelegt wurde, noch die MOX-Option ausreichende Fortschritte machen, um die vorliegenden Plutoniumbestände mit einer auch nur annähernd zufrieden stellenden Geschwindigkeit abzubauen.

Wir beschränken uns bei den Analysen in diesem Projekt auf reaktorgestützte Optionen zur Plutoniumbeseitigung, die heute bereits realistisch (d. h. mit existierenden Leichtwasserreaktoren) umsetzbar sind. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Ansatz sogenannter uranfreier Brennstoffe (*inert matrix fuel*, IMF), mit denen im Unterschied zu bisherigen Uran-Plutonium-Mischoxid-Brennstoffen (MOX) eine effiziente Reduzierung der vorhandenen Plutoniummengen möglich wäre. Kriterien präventiver Rüstungskontrolle zur Bewertung verschiedener technischer Optionen werden identifiziert: technische Machbarkeit, politisch-gesellschaftliche Akzeptanz, Umwelt- und Sicherheitsaspekte, Aspekte der nuklearen Nichtverbreitung (inkl. Abrüstung) und Kostengesichtspunkte. Hieraus werden wichtige Indikatoren für den Vergleich von MOX-Brennstoffen und IMF abgeleitet (erreichbare Plutoniumreduktion, Durchsatzmenge im Reaktor, im abgebrannten Brennstoff verbleibende Plutoniummenge, Konzentration und Isotopenzusammensetzung des verbleibenden Plutoniums, sowie dessen Wärmerate und Neutronenhintergrund in Hinblick auf eine mögliche Waffenverwendbarkeit).

Um zu Aussagen hinsichtlich dieser Indikatoren zu kommen, werden abbrandabhängige Eigenschaften von MOX-Brennstoffen und IMF (hier auf Basis der aussichtsreichen IMF-Brennstoffe mit einer Yttrium-stabilisierten Zirkondioxid-Matrix) bestimmt. Zu diesem Zweck wurde das Programmsystem MCMATH, das moderne Monte-Carlo-Neutronentransportprogramme nutzt, innerhalb des Projekts neu entwickelt. Damit werden weitestgehend automatisierte Berechnungen für die betrachteten plutoniumhaltigen Brennstoffe ermöglicht. So ist eine Beschreibung des Abbrandverhaltens, aus der insbesondere die Veränderung des Plutoniumgehalts während des Reaktorbetriebs hervorgeht, und zum anderen die Bestimmung von Reaktivitätskoeffizienten möglich, welche für die Sicherheitsaspekte des Anlagenbetriebs zentrale Bedeutung haben.

Berechnungen werden für typische Isotopenzusammensetzungen von „Reaktor-Plutonium“ (RPu) und von „Waffen-Plutonium“ (WPu) durchgeführt. Zunächst wird mit Hilfe der Simulationsrechnungen die Zusammensetzung von Referenzbrennstoffen für MOX- und für IMF-Varianten bestimmt. Diese Referenzbrennstoffe werden über die vorhandene Anfangsreaktivität festgelegt, so dass ein vorgegebener Zielabbrand entsprechend 50 Megawatt-Tagen pro Kilogramm Brennstoff (für MOX), erreicht werden kann. Dies entspricht einer Standzeit der Brennelemente von etwa vier Jahren und ist damit bereits etwas höher als ein heute üblicher Abbrand. Es zeigt sich, dass bei IMF-Brennstoffen sog. brennbare Neutronengifte eingesetzt werden müssten, um für ein erwünschtes Reaktivitätsverhalten zu sorgen. Unter mehreren Kandidaten wird Erbium als der am besten geeignete Neutronenabsorber identifiziert, auch weil damit wesentliche Reaktivitätskoeffizienten des Brennstoffs günstigere Werte annehmen.

Für die Referenzbrennstoffe wird dann die Veränderung der anfänglichen Plutoniumbeladung während des Reaktorbetriebs berechnet. Damit werden insbesondere Aussagen über den Grad der Plutoniumeliminierung und die Eigenschaften der verbleibenden Plutoniummengen ermöglicht.

Es zeigt sich, dass die IMF-Option den MOX-Brennstoffen hinsichtlich wesentlicher Indikatoren deutlich überlegen ist. Der Anteil der Plutoniumeliminierung liegt für realistisch einsetzbare IMF bei 70% (für RPu) bzw. 76% (für WPu) gegenüber 30% bzw. 35% für MOX. Das für die Waffenreinheit entscheidende Plutoniumisotop Pu-239 wird in IMF fast vollständig eliminiert. Die anfängliche Plutoniumbeladung der Brennstoffe ist bei IMF höher als bei

MOX, so dass die Durchsatzmenge pro Jahr höher liegt und bei unterstellten gleichen Herstellungskosten von IMF und MOX auch die Gesamtkosten für die Brennstofffertigung geringer wären. Die Konzentration des verbleibenden Plutoniums im abgebrannten Brennstoff ist trotz höherem Anfangsgehalt nur etwa halb so groß wie bei MOX, so dass eine spätere erneute Abtrennung aus dem abgebrannten Brennstoff zur Waffenherstellung deutlich unattraktiver wäre. Die Isotopenzusammensetzung des verbleibenden Plutoniums verändert sich bei IMF weitaus stärker als bei MOX. Dies hat deutliche Konsequenzen für die Wärme- und Neutronenrate des verbleibenden Plutoniums und würde die Verwendbarkeit des Plutoniumrests für Kernwaffen nach einer erneuten Abtrennung aus dem abgebrannten Brennstoff erheblich einschränken.

Der kriteriengeleitete Vergleich der IMF- und der MOX-Option führt insgesamt zu klaren Vorteilen von IMF. Offen bleibt wie diese Strategie bei einem umfassenden Vergleich mit anderen nicht reaktor-gestützten Beseitigungsoptionen, etwa Immobilisierungsoptionen, abschneiden wird.

Empfehlungen für die Politik schließen sich daran an. Angesichts der großen Plutoniumbestände weltweit und der damit verbundenen Proliferationsgefahren sollte ein Verzicht auf Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennstoffe mit Plutoniumabtrennung und ein Ende der Nutzung von separiertem Plutonium in zivilen Nuklearprogrammen erfolgen. Bereits vorliegende Bestände sollten schnellst möglich abgebaut werden. Dies kann Bedeutung für Überlegungen zu einem wirksamen *Fissile Material Cutoff Treaty* (FMCT) haben. Die Vorteile von IMF stellen die Bedeutung der MOX-Option für die Plutoniumbeseitigung in Frage. Daher sollte die IMF-Technologie weiter untersucht und ggf. zur technischen Umsetzbarkeit geführt werden. Allerdings ist eine umfassendere Debatte über die Beseitigungsoptionen unter Einschluss der Immobilisierungsoptionen zu führen, bei der keine Reaktoren genutzt werden, sondern das Plutonium gemeinsam mit radioaktiven Abfällen in eine direkt endlagerefähige Form überführt wird.

Proliferationspotential von Spallationsneutronenquellen und Wege zu mehr Proliferationsresistenz

Eine frühzeitige Abschätzung der proliferationsrelevanten Potentiale dieser Technologie soll einen exemplarischen Beitrag zur präventiven Rüstungskontrolle leisten.

Zunächst wird die Spallationstechnologie selbst erläutert und ihr Entwicklungspotential als Forschungsneutronenquelle – auch als Alternative zu Forschungsreaktoren – genauer betrachtet. Dabei zeigt sich, dass Spallationsneutronenquellen (SNQ) voraussichtlich die Zukunftstechnologie im Bereich der Forschungsneutronenquellen sein werden. Gleichzeitig sorgt die technologische Dynamik für ein wachsendes Proliferationsrisiko. Das prinzipielle Proliferationspotential durch Materialerbrütung von Plutonium, aber auch weiterer waffenfähiger Nuklearmaterialien wie Uran-233 oder Tritium, wird hier erstmalig in ausführlicher Form und quantitativ diskutiert. Ein Schwerpunkt bildet die Analyse einer möglichen Plutoniumproduktion. Zu diesem Zweck wird eine Signifikanzschwelle von 500 Gramm Plutoniumproduktion pro Jahr eingeführt.

Simulationsrechnungen für die Materialproduktion in Abhängigkeit von wesentlichen Anlagenparametern (Beschleunigerstrom und Protonenenergie) werden durchgeführt, wobei modernste Monte-Carlo-Neutronentransportprogramme im Hochenergiebereich zum Einsatz kommen. Zunächst werden verschiedene Maximalszenarien gerechnet, bei denen der Protonenstrahl der SNQ direkt auf ein kugelsymmetrisches Produktionstarget aus Uran gerichtet wird. Es zeigt sich dabei, dass fast ausschließlich das Plutoniumisotop Pu-239 entsteht, also Plutonium höchster Waffenreinheit.

Anschließend werden realistischere Produktionsszenarien diskutiert, bei denen ein zylindersymmetrisches Bestrahlungstarget angenommen wird, dessen Größe variiert und das identisch mit dem Brutblanket für die Materialproduktion oder getrennt davon aufgebaut werden kann. Schließlich werden vier konkretisierte mögliche Produktionsszenarien analysiert: 1. Eine SNQ für Forschungszwecke wird umfunktioniert und Plutonium durch direkte Protonenbestrahlung eines Urantargets oder des *Beam-Dumps* produziert. 2. In einer SNQ für Forschungszwecke werden zusätzliche Produktionsblankets in der Nähe des Targets oder am Ende eines Strahlrohrs eingesetzt. 3. Aufbau einer relativ simplen Produktionsanlage aus einem Beschleuniger und einem Urantarget. 4. Versiertere Produktionsanlage mit einem Brutblanket getrennt vom Target, die bis zu einer subkritischen Reaktoranlage weiterentwickelbar ist.

Von allen Szenarien ist nur die Benutzung eines Strahlrohres einer SNQ im zweiten Szenario irrelevant. Für alle anderen Szenarien besteht prinzipiell die Möglichkeit, kernwaffenrelevantes Material (Pu-239) in Mengen oberhalb der Signifikanzschwelle (0,5 kg/Jahr) bis hin zu einigen zehn Kilogramm pro Jahr verfügbare Strahlzeit herzustellen. In einigen Szenarien (insbes. Szenario 4) gilt dies auch für relativ kleine Beschleunigeranlagen. Anlagen, die zum Zweck der Plutoniumproduktion gebaut und konzipiert werden, sind nach Ansicht der Autoren auch diejenigen mit dem größten Proliferationspotential. Anstelle von Plutonium könnten ebenfalls relevante Mengen an weiteren kernwaffenrelevanten Materialien (Uran-233 aus Thorium-232 oder Tritium aus Lithium oder Helium-3) produziert werden. Die denkbaren Produktionsraten steigen mit der erwartbaren technologischen Entwicklung, insbesondere etwa linear mit höheren erreichbaren Beschleunigerströmen.

Angesichts dieses Proliferationspotentials von Spallationsneutronenquellen werden Maßnahmen zu Erhöhung der Proliferationsresistenz diskutiert. Zunächst ist an *Safeguards* zu denken. Anlagenspezifische *Safeguards* für SNQs gibt es aber bislang nicht, da die IAEO-Definitionen für mögliche Produktionsstätten von waffentauglichem Material nur Reaktoren einbezogen hatten. Daher wird ein konkreter Vorschlag unterbreitet, um angemessene *Safeguards* für Spallationsanlagen auf den Weg bringen zu können. Weiterhin werden erste Ansätze für Maßnahmen im Bereich von *Safeguards* und der proliferationsresistenten Gestaltung von SNQs diskutiert.

Zusammen mit der Dynamik in der Entwicklung von Beschleunigertechnologien und SNQs, die in den nächsten Jahren und Jahrzehnten erwartet werden kann, zeigen die quantitativen Ergebnisse, dass es essentiell ist, die zukünftigen Entwicklungen genau zu beobachten und im Sinne einer präventiven Rüstungskontrolle zu begleiten sowie frühzeitig zu reagieren. Da die Technologien gerade die Schwelle der Kommerzialisierung erreichen und eine weltweite Verbreitung der Technologie erst begonnen hat, ist es möglich, in dieser frühen Phase Kontrollmechanismen (z.B. *Safeguards*) oder Gestaltungskonzepte (insbes. proliferationsresistente Auslegungen) auszuarbeiten und zu implementieren, um eine möglichst ausschließlich friedliche Nutzung von Spallationsneutronenquellen zu gewährleisten.

In einem kurzen Schlusskapitel wird eine Einordnung des Projekts in das Konzept Präventiver Rüstungskontrolle im Nuklearbereich vorgenommen.

Abstract

Today, the most significant barrier against the access to nuclear weapons is to take hold on sufficient amounts of nuclear weapon-relevant nuclear materials. It is mainly a matter of fissionable materials (like highly enriched uranium and plutonium) but also of fusionable tritium. These can be used as reactor fuel in civil nuclear programmes but also in nuclear weapon programmes. To stop or to hinder nuclear proliferation, in consequence, there is not only a need to analyse open or covered political objectives and intentions. In the long term, it might be more decisive to analyse the intrinsic civil-military ambivalence of nuclear materials and technologies, which are suitable for sensitive material production. A far-sighted strategy to avoid proliferation dangers should take much more account to technical capabilities as it is done in the political debate on nuclear non-proliferation so far. If a technical option is at a state's disposal, it is extremely difficult and lengthy to revert that again.

The dangers, which one has to react to, are stemming from already existing stocks of nuclear weapon-relevant materials – in the military as well as in the civil realm – and from existing or future technologies, which are suitable for the production of such materials (cf. info 1 and 2). Therefore, the overall approach of this research project is to strive for a drastic reduction of the access to nuclear weapon-relevant material and its production capabilities. Thus, on one hand the nuclear proliferation by state actors could be answered more effectively, on the other hand by that approach a decisive barrier against the access on nuclear weapons by sub-national groups and terrorists could also be erected.

For this purpose, safeguards of the International Atomic Energy Agency (IAEA) and other measures of physical accountancy will remain indispensable elements of arms control. However, one has to consider that the goal of nuclear non-proliferation could not be achieved and secured in the end by safeguards, and that the problematic of nuclear ambivalence could not be seriously tackled. Therefore, in this investigation, we think beyond safeguards and try to find out more advanced ways of preventive arms control and of the concept of proliferation resistance. At an early stage and with a preventive perspective appropriate measures have to be developed and to be implemented, which serve the aim of nuclear non-proliferation (i.e. no further spread and disarmament) most effectively. In particular, we discuss three approaches using technological examples as part of a concept of preventive nuclear arms control: the disposal of nuclear weapon materials, the anticipation of technology-driven proliferation risks, and the improvement of proliferation resistance.

The disposal approach has an immense impact on the efforts to make nuclear disarmament irreversible. Without the disposal of nuclear weapon-relevant materials which at least has to ensure that it is converted to a more proliferation resistant form, nuclear disarmament remains incomplete and unconvincing. That necessity exists also in states, which in principle possess a weapon-capability due to the access to sufficient and suitable amounts of nuclear weapon-relevant materials.

A systematic effort to anticipate predictable dangers by nuclear technologies is much more necessary than ever, today, due to the ongoing scientific-technological dynamic. If new dangerous potentials are discovered early in the development process, there is a chance to have an impact on the technological development itself. In consequence, this leads to the concept of proliferation resistance.

By introducing proliferation resistance, intrinsic technical possibilities for shaping nuclear technologies and facilities or for the physical conversion of weapon materials are used in order to ensure a barrier as high as possible against an imaginable military use.

The research project is focusing on two highly relevant technological challenges of nuclear non-proliferation, which are directly connected with the central role of weapon-relevant materials, and it is trying to present practical solutions on a technical basis:

- Discover paths for the disposal of existing amounts of nuclear weapon-relevant materials elaborating on the example of technically-based plutonium disposal options: central technical questions of the possible use of uranium-free inert matrix fuel (IMF) in currently used light water reactors will be addressed in order to clarify which advantages or disadvantages do exist in comparison to other disposal options. The investigation is limited on the comparison with one other reactor-based option, the use of uranium-plutonium mixed-oxide (MOX) fuels.
- Analysis of proliferation relevant potentials of new nuclear technologies (accessibility of weapon materials): Exemplary investigation of spallation neutron sources in order to improve this technology by a more proliferation resistant shaping. Although they are obviously capable to breed nuclear weapon-relevant materials like plutonium, uranium-233 or tritium, there is no comprehensive analysis of non-proliferation aspects of spallation neutron sources up to now.

Both project parts provide not only contributions to the concept of preventive arms control but also to the shaping of technologies, which is oriented towards the criteria of proliferation resistance.

Options for the disposition of plutonium stockpiles – analysis of uranium-free fuels (IMF)

Both, “weapon-grade plutonium”, which has been produced especially for military use, as well as “reactor-grade plutonium”, which is produced in typical power reactors, could be used for the development of nuclear weapons. This applies particularly to plutonium, that has been separated already from spent fuel, and for military excess stocks, which have been released due to disarmament measures. It is absolutely necessary that disposition strategies for plutonium must reduce the accessibility, the usability or even the absolute amount. Without these measures, political and institutional considerations on irreversible disarmament or non-proliferation could not be reasonably thought through and eventually put into practice.

An overview of the currently existing plutonium stockpiles and handling reveals that the amount produced with civil facilities has approximately reached the military inventory (each 250 metric tons respectively, enough for 50,000 warheads). A short evaluation of programs started in the mid-nineties to dispose of “weapon-grade plutonium” by the US and Russia shows that either the immobilisation (in particular the vitrification together with highly radioactive waste), which was put on ice in the US in 2002, nor the MOX option have made sufficient progress so that existing plutonium stockpiles would be reduced in a satisfying pace.

We limit our analysis in this project on those reactor based options for plutonium disposition which could be realistically implemented with today's existing light water reactor technology. A special focus is on so called uranium-free fuels (inert matrix fuels, IMF). In contrast to uranium-plutonium mixed-oxide fuels (MOX), they provide a more efficient way to reduce plutonium inventories. Criteria for preventive arms control are going to be identified: Technical feasibility, political and societal acceptance, environmental and safety aspects, aspects of nuclear non-proliferation (including disarmament) and cost effectiveness. From these criteria, important indicators for the comparison of IMF and MOX fuels are derived (achievable plutonium reduction, reactor throughput, concentration and isotope vector of

remaining plutonium and its decay heat rate and neutron background with respect to weapon-usability).

For results considering these indicators, burn-up related properties of MOX fuels and IMF (based upon the promising IMF with an yttrium stabilized zirconium dioxide matrix) are determined. The programme system MCMATH which uses modern Monte Carlo neutron transport programmes was newly developed in the project for that purpose. It allows to a great extent for automated calculations of considered plutonium-containing fuels. The description of the burn-up behaviour, which shows especially the change in the plutonium content, and the investigation of reactivity coefficients are made possible by that. The latter has central relevance for safety aspects of reactor operation.

Calculations are performed for the typical isotope combinations of “reactor-grade plutonium” (RPu) and “weapon-grade plutonium” (WPu). First, compositions for reference fuels of IMF and MOX fuels are determined. With these reference fuels and their corresponding initial reactivities it should be possible to reach a target burn-up equivalent to 50 megawatt days per kilogram heavy metal (for MOX). This correlates with four years of reactor use of the fuel element and is slightly more than typical power reactor burn-up today. It appears that IMF makes the use of burnable neutron poisons necessary to control the reactivity. Under a variety of candidates, erbium is identified as the most eligible because important reactivity coefficients carry more favourable values. Subsequently, the decrease of the initial plutonium loading during reactor operation is calculated. This offers to draw conclusions on the degree of plutonium elimination and the properties of the residual plutonium.

It can be demonstrated that the IMF option is superior to MOX fuel regarding important indicators. The amount of eliminated plutonium for realistically usable IMF is about 70% (for RPu) or 76% (for WPu) respectively whereas for MOX fuel only about 30% (for RPu) or 35% (for WPu) is achievable. The plutonium isotope Pu-239 which is predominant for the weapon usability is eliminated nearly totally with IMF. The initial plutonium loading with IMF is higher than with MOX fuels, therefore the annual throughput is high, too. Assuming equal manufacturing costs for IMF and MOX fuel, the total cost for IMF would therefore be lower. The concentration of residual plutonium in spent fuel is half of the one in MOX spent fuel, even though the initial amount is higher. That way, a possible separation of plutonium of spent fuel for weapon production is less attractive in case of IMF. Additionally, the plutonium isotope vector is modified much more using IMF compared to MOX fuel. This has important consequences for the resulting decay heat and neutron rate of the remaining plutonium: if a proliferator would intend to reprocess the spent fuel ones again, the weapon-usability of that plutonium would be considerably reduced.

In sum, the comparison of IMF and MOX fuel using the above mentioned criteria shows obvious advantages of IMF. However, it remains an open question, how the IMF option compares to other disposal options which are not reactor-based (e.g. immobilisation options).

Policy recommendation can go along with these results. Given the large plutonium stockpiles existing worldwide and the related proliferation risks, reprocessing of spent fuel with separation of plutonium should be abandoned as well as the use of separated plutonium in civil nuclear programmes. Existing inventories should be disposed of as fast as possible. This could have impacts on considerations of an effective Fissile Material Cut-off Treaty (FMCT). The advantages of IMF challenge the relevancy of the MOX option for plutonium disposition. Therefore, IMF should be researched further and, should the occasion arise, its technical implementation should be prepared. However, a comprehensive discussion on

disposition options has to be carried out including immobilisation options where plutonium is immobilized together with highly radioactive waste and prepared for final geologic storage.

Proliferation potential of spallation neutron sources and ways to more proliferation resistance

An early assessment of the proliferation relevant potentials of this technology should contribute exemplarily to preventive arms control.

Initially, the spallation technology is explained and its potential as research neutron source – also as alternative to research reactors – is examined. It shows that spallation neutron sources (SNS) will probably be the future key technology in the area of research neutron sources. Concurrently, the technological dynamics provides an increased proliferation risk. The principal proliferation potential by breeding of plutonium and other weapon usable materials like uranium-233 or tritium, is discussed in this project for the first time in detail and quantitatively. The analysis of plutonium production possibilities is in the focus of the investigation. For this purpose a threshold of significance of 500 grams annual plutonium production is introduced.

Simulations are calculated for the material production in dependency of relevant facility parameters (accelerator current and proton energy) using modern Monte Carlo neutron transport programmes in the high energy range. First, different maximal scenarios are computed where the proton beam of the SNS hits a spherical uranium target. These calculations reveal that mainly plutonium-239 is produced, which is plutonium of highest weapon quality.

A discussion of more realistic production scenarios follows, where a cylindrical radiation target is assumed. The size is varied and the spallation target can be identical to the breeding blanket for material production or arranged separately. Eventually, four concrete production scenarios are analysed: 1. A SNS for research purposes gets converted, so that plutonium is produced by direct proton radiation of an uranium target or the beam dump. 2. Inside a SNS for research purposes additional production blankets are placed near the target or at the end of one beamtube. 3. Set up of a simple production facility consisting of an accelerator and an uranium target. 4. Sophisticated production facility with breeding blanket separated from the spallation target, with the possibility to enhance the facility to a subcritical reactor.

Of all scenarios only the use of a beam tube (according to the second scenario) seems to be irrelevant. All other scenarios offer the possibility to produce weapon relevant material (Pu-239) beyond the threshold of significance (0.5kg/a) and up to several ten kilograms per year of available beam time. In some scenarios (especially scenario 4), this also applies to relatively small accelerator facilities. Facilities designed and built to produce plutonium are, as the authors believe, those with the highest proliferation potential. Instead of plutonium, significant amounts of other weapon relevant materials (uranium-233 from thorium-232, tritium from lithium or helium-3) could be produced. The possible production rates increase with the expectable technological development; in particular there is a linear dependency to the increase in accelerator currents.

In the light of that proliferation potential of spallation neutron sources, measures to increase the proliferation resistance are discussed. Firstly, one can think of safeguards. However, there are no facility specific safeguards for SNS yet, since the IAEA definitions for possible production facilities only include reactors. Hence, a concrete proposal is put forward, so

that appropriate safeguards for spallation facilities could be introduced. Furthermore, first approaches for the proliferation resistant shaping of SNS are discussed.

Together with the expected development of accelerator technologies and SNS, which can be expected in the next years and decades, our quantitative results indicate that it is essential to have a detailed look on the future developments and to react on an early stage. The technologies are on the edge to commercialisation, they just begin to spread worldwide. Therefore, in this early phase, it should be possible to elaborate on control mechanisms (e.g. safeguards) and the appropriate shaping of technology (providing better proliferation resistance) and to implement these. This should guarantee the exclusively peaceful use of spallation neutron sources.

In a final chapter the project is placed in context with the concept of preventive arms control in the nuclear sector.

1. Einführung in die Thematik

Die Existenz von Kernwaffen und ihre Weiterverbreitung stellen eine ständige Bedrohung für den Weltfrieden dar und sind ein wesentliches Element in regionalen Konfliktkonstellationen geworden.

Der Zugang zu Kernwaffen ist aufgrund der hohen technologischen Hürde nur mit entsprechendem Aufwand möglich. Die Haupthürde ist heute - mehr als sechs Jahrzehnte nach der Konstruktion erster Atomwaffen - vor allem der Zugriff auf ausreichende Mengen an kernwaffenrelevanten Nuklearmaterialien (vgl. Info 1) und weit weniger die Konstruktion eines funktionsfähigen Kernsprengkörpers. Die Beschaffung des nuklearen Spaltstoffes ist gewissermaßen das entscheidende Nadelöhr, durch das staatliche oder substaatliche Akteure gehen müssen, bevor sie mit dem Bau eines Kernsprengkörpers beginnen könnten. Der aktuelle Streit um das nordkoreanische und das iranische Nuklearprogramm verweisen mit großer Deutlichkeit auf diese zentrale Problematik. Im Kern geht es neben offenen oder verdeckten politischen Zielsetzungen und Absichten um die intrinsische zivil-militärische Ambivalenz von nuklearen Materialien und Technologien. Dabei handelt es sich vorrangig um Spaltstoffe (wie hochangereichertes Uran und Plutonium), die als Brennstoffe in zivilen Nuklearprogrammen aber ebenso in Kernwaffenprogrammen eingesetzt werden können.

Info 1

Was sind kernwaffenrelevante Materialien und welche Mengen werden für Kernwaffen benötigt?

Ein chemisches Element wird durch die Anzahl der Protonen im Atomkern definiert. Daneben kann der Atomkern noch eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen enthalten, die die chemischen Eigenschaften des Atoms nicht beeinträchtigen, jedoch zu unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften führen (wie z. B. der Spaltbarkeit durch weitere langsame oder schnelle Neutronen). Damit sind verschiedene Isotope eines Elementes definiert. Neben der Kurzbezeichnung des Elementes (z. B. Pu für Plutonium) wird daher zur Kennzeichnung des jeweiligen Isotops noch die Gesamtzahl von Protonen und Neutronen angegeben (z. B. Pu-239, Pu-240, U-233 etc.). Der Atomkern von Pu-239 besteht beispielsweise aus 94 Protonen und 145 Neutronen.

Die spaltbaren Materialien für Kernwaffen sind Plutonium (alle Isotope, insbesondere Pu-239) und die Uranisotope U-233 und U-235. (Uran-233 wird allerdings derzeit nicht in aktiven Kernwaffenarsenalen eingesetzt). Im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung von Kernwaffen in fortgeschrittenen Waffenprogrammen (vertikale Proliferation) ist Tritium von besonderem Interesse. Dieser fusionsfähige Stoff wird für „Booster“-Bomben oder thermonukleare Kernwaffen der zweiten Generation benötigt. Auch einige andere seltenere Elemente wie Neptunium (Np) könnten theoretisch in Kernwaffen eingesetzt werden.

Die *Standing Advisory Group on Safeguards Implementations* (SAGSI) der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) definierte 1977 eine „*significant quantity*“ als Masse an spaltbarem Material, die ausreichend wäre zum Bau einer einfachen Waffe der ersten Generation (Implosionstyp), und berücksichtigt hierbei auch Materialverluste bei der Herstellung. Als signifikante Mengen werden 8 kg Plutonium und 25 kg hochangereichertes Uran (ca. 90% U-235) und 8 kg U-233 zugrundegelegt. Fortgeschrittenere Waffendesigns benötigen jedoch weitaus weniger spaltbares Material. Schon eine Menge von 4-5 kg Plutonium bzw. U-233 oder etwa 12 kg HEU reicht aus, um einen Nuklearsprengkopf zu bauen [Cochran und Paine 1995].

Für Tritium gibt es noch kein internationales Kontrollregime. Wenige Gramm dieses Wasserstoffisotops reichen jedoch aus, die Effizienz einer Kernwaffe der 1. Generation durch Erhöhung der Spaltausbeute stark zu verbessern (Booster-Bombe).

Weiterhin geht es um ambivalente, sensitive Nukleartechnologien (wie beispielsweise Ultrazentrifugen zur Urananreicherung oder Wiederaufarbeitungstechnologien zur Abtrennung von Plutonium aus bestrahlten Brennstoffen), die zur Produktion bzw. Gewinnung von Waffenstoffen geeignet sind (vgl. Info 2).

Info 2

Erzeugung kernwaffenrelevanter Materialien:

Plutonium wird ebenso wie Uran-233 und Tritium durch Neutronenreaktionen in geeigneten Brutstoffen produziert. Daher ist jede Technologie, mit der hohe Neutronenflüsse zur Verfügung gestellt werden, im Prinzip dazu geeignet, Plutonium aus Uran-238, U-233 aus Thorium oder Tritium aus Lithium bzw. Helium-3 zu erbrüten. Das Isotop U-235 wird dagegen nicht durch Neutronenreaktionen gewonnen, sondern durch Hochanreicherung des Isotops U-235 aus natürlichem Uran mit einem Anteil von 0,7 % U-235 auf etwa 90% (*Highly Enriched Uranium* - HEU). Reaktorbrennstoff benötigt in der Regel lediglich eine Anreicherung auf 3,5 bis 4% U-235 und gehört zur Kategorie des *Low Enriched Uranium* (LEU). Geeignete Anreicherungstechnologie (z.B. Diffusions- und Zentrifugentechnologie) kommt dafür zum Einsatz.

Produktion von Plutonium:

Plutonium entsteht durch Neutroneneinfang und zwei anschließende radioaktive Zerfälle aus dem Uranisotop U-238, das auch Hauptbestandteil heute üblicher Reaktorbrennstoffe ist.* Dabei wird zunächst das Plutoniumisotop Pu-239 gebildet. Aus diesem entstehen durch sukzessive Neutronenreaktionen weitere Plutoniumisotope (Pu-238, Pu-240, Pu-241, Pu-242) und hieraus nach weiteren Umwandlungsprozessen weitere sog. Aktinide (insbes. Americium- und Curiumisotope). In einem typischen Leichtwasserreaktor einer elektrischen Leistung von einem Gigawatt, wie er heutzutage betrieben wird, entstehen pro Jahr etwa 250 kg Plutonium. Im Reaktorbrennstoff wird U-235 und ein Teil der ungeradzahigen Plutoniumisotope gespalten, letztere tragen damit auch zur Energieerzeugung bei. Bei der Wiederaufarbeitung nach dem heute üblichen PUREX-Verfahren wird mittels eines chemischen Trennverfahrens das verbliebene Plutonium (und das Uran) aus dem abgebrannten Brennstoff abgetrennt und liegt anschließend in reiner Form vor (typischerweise als Oxid). Eine Abtrennung von Plutonium fand sowohl im militärischen Bereich für die Waffenproduktion, als auch im zivilen Bereich zur Gewinnung von Plutonium als Spaltmaterial für den erneuten Einsatz in Reaktoren statt (z.B. in Form von sog. Mischoxid-Brennstoffen – MOX**). „Waffen-Plutonium“ (WPu) unterscheidet sich von „Reaktor-Plutonium“ (RPu) nur durch die kürzere Bestrahlungsdauer im Reaktor und die daraus folgende höhere Reinheit des Waffen-Plutoniums (hoher Pu-239-Anteil).

* Die Plutoniumproduktion muss nicht in einem Reaktorbrennstoff stattfinden, sondern kann auch durch Neutronenbestrahlung von Urantargets erfolgen.

** Aus MOX-Brennstoff, der noch nicht im Reaktor eingesetzt war, kann vergleichsweise einfach das Plutonium wieder herausgelöst werden, so dass er ebenfalls als Quelle der Materialbeschaffung für Kernwaffen dienen kann.

Die Kontrolle der Materialbeschaffung stellt daher auch die effektivste Eingriffsmöglichkeit dar, um den Zugang zu Kernwaffen zu erschweren bzw. unmöglich zu machen (vgl. z.B. [Bunn und Wier 2006], [IPFM 2006]). Der zweite Grundgedanke unserer Untersuchung besteht folgerichtig darin, dass den technischen Möglichkeiten („capabilities“), die einmal für einen Staat zur Verfügung stehen, weit mehr Beachtung geschenkt werden muss, als dies bislang in der politischen Debatte über nukleare Nichtverbreitung der Fall ist. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass die nationalstaatlich definierten Randbedingungen, die über aktuelle Zielsetzungen („intentions“) bestimmen, einerseits in Abhängigkeit zu den technischen Möglichkeiten und längerfristig angelegten Technologieprogrammen stehen und andererseits weit mehr den (immer wieder raschen) Wandlungen des politischen Alltags unterworfen sind, als dies für technische Möglichkeiten gilt. Ein nachhaltiger und weltweiter Stopp der technisch definierten Produktionsmöglichkeiten für Kernwaffen hat dementsprechend nach Ende der Ära der Blockkonfrontation an Bedeutung zugenommen.

Da die Gefahren, auf die reagiert werden muss, von bereits bestehenden kernwaffenrelevanten Materialien sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich sowie von bereits existierenden oder zukünftigen Technologien, die zur Produktion entsprechender Materialien geeignet sind (vgl. Info 2) ausgehen, ist der übergreifende Ansatz des Projektes die Bemühung um eine drastische Reduzierung der Zugriffsmöglichkeit auf kernwaffenrelevante Materialien. Einerseits kann so der nuklearen Proliferation durch Staaten wirksamer begegnet werden, andererseits kann durch diesen Ansatz auch eine entscheidende Hürde gegen den Zugriff substaatlicher Gruppen und Terroristen auf Kernwaffen aufgebaut werden.

Prävention und Proliferationsresistenz

Das traditionelle Konzept des Umgangs mit nuklearen Proliferationsgefahren steht in enger Verbindung mit den Sicherungsmaßnahmen („*Safeguards*“) der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO), denen sich alle Nicht-Kernwaffenstaaten unterworfen haben, die dem nuklearen Nichtverbreitungsvertrag (NVV) beigetreten sind. Eine konsequente Fortentwicklung besteht in dem Vorschlag, die Kernwaffenstaaten sollten sich ähnlichen Prozeduren für ihre nicht-militärischen Aktivitäten unterwerfen, insbesondere auch was die internationale Überwachung der Bestände an Kernwaffenmaterialien aus der Abrüstung von Kernwaffen angeht. Sicherlich ist unbezweifelbar, dass *Safeguards* ein unverzichtbares Element der Rüstungskontrolle darstellen und für die Vertrauensbildung unter den Staaten bedeutsam sind. Aber es muss bedacht werden, dass sie die nukleare Ambivalenzproblematik weder grundlegend angehen, noch die tatsächlich existierenden Probleme auf der technologischen Seite lösen können. *Safeguards* können bestenfalls zu einer nachträglichen Entdeckung von Verstößen gegen bereits vertraglich abgesicherte Normen der nuklearen Nichtverbreitung führen und dies zudem auf Basis eines lediglich wahrscheinlichkeitstheoretisch angelegten Überwachungskonzepts. Dabei greifen *Safeguards* tendenziell zu spät. Sie können, wie die Erfahrungen bei Staaten, die der Proliferation verdächtigt werden, und bei spezifischen sensitiven Technologien zeigen, in relevanten Fällen nicht die Aufdeckung der Abzweigung von signifikanten Materialmengen garantieren. Weiterhin können sie zur Wahl von Umgehungsstrategien oder nicht-deklarierten, geheimen Aktivitäten führen und bieten keinen wirksamen Schutz gegenüber nicht-staatlichen Akteuren.

Es erscheint daher notwendig, über *Safeguards* hinaus zu denken und weiter gehende Möglichkeiten der Prävention und des Konzeptes der Proliferationsresistenz zu eruieren [Liebert 2005]. Ein Weg besteht in der Suche nach Möglichkeiten der präventiven Kontrolle, d.h. nach geeigneten technischen Möglichkeiten, die es erlauben, Vertragsverletzungen so frühzeitig zu entdecken, dass die Schwelle zur Vorbereitung eines Waffenprogramms noch nicht überschritten ist. Ein anderer Weg der Prävention besteht in der Bemühung um eine möglichst vollständige und nicht mehr rückholbare Beseitigung von vorhandenen Beständen waffentauglicher Nuklearmaterialien. Ein weiterer Ansatzpunkt liegt in der proliferationsresistenten Gestaltung von sensitiven Nukleartechnologien, die zur Herstellung kernwaffenrelevanter Materialien genutzt werden können. Weiterhin geht es um die Antizipierung der proliferationsrelevanten Potentiale von neuen Nukleartechnologien.

Der Beseitigungsansatz hat große Bedeutung für die Anstrengung, die Abrüstung irreversibel zu machen. Nukleare Abrüstung ohne Beseitigung der zugehörigen Spaltstoffe (und eigentlich auch der fusionsfähigen Stoffe) bleibt unvollständig und letztlich nicht überzeugend. Ähnliches gilt für die Staaten, die aufgrund ihres Zugriffs auf eine ausreichende Menge und Qualität kernwaffenrelevanter Materialien im Prinzip kernwaffenfähig sind. Ein überzeugendes Verhalten der Kernwaffenstaaten – aber auch der kernwaffenfähigen Staaten – in diesem Punkt hat große Bedeutung für die weltweite Vertrauensbildung und den Erhalt des angeschlagenen Nichtweiterverbreitungsregimes.¹ Es besteht zumindest die Möglichkeit, die gefährlich wachsende weltweite Asymmetrie zwischen den Kernwaffen- und den Nicht-Kernwaffenstaaten, sowie den Staaten, die bereits über einen faktischen Zugriff auf kernwaffenrelevante Materialien verfügen und solchen Staaten, denen dieser Zugriff verwehrt bleiben soll, durch verschiedene Maßnahmen zu verringern. Eine ernst-

¹ Hierbei wäre auf längere Sicht nur ein vollständiger Ansatz von Gewicht, der nicht nur gewisse Überschussmengen für die Beseitigung frei gibt, sondern Schritt für Schritt sämtliche Waffenstoffe dem Zugriff für alle möglichen Akteure entzieht. Kleine Schritte sind sicher nicht zu vernachlässigen, aber angesichts der großen weltweit gelagerten Mengen (zu den Plutoniummengen vgl.: Abbildung 1) bestünden die Gefahren ansonsten unvermindert fort.

hafte Beseitigungsstrategie wäre auch der sicherste Weg, dem nuklearen Terrorismus effektiv vorzubeugen.

Einen weiteren Kern der Überlegungen zur Prävention bildet das Konzept der Proliferationsresistenz. Bereits in den 1970er Jahre wurde erkannt, dass der nukleare Nichtverbreitungsvertrag (NVV) zu viele Türen für mögliche Waffenprogramme offen gelassen hatte, zumal er die Verbreitung und Weiterentwicklung der (zivilen) Nukleartechnologie ohne jede Einschränkung propagiert.² Daraus entwickelte sich der Vorschlag, nukleare Technologien proliferationsresistenter zu machen [Feiveson 1978]. Damit sollen Nukleartechnologien robust gemacht werden gegen ihre mögliche Nutzung in Proliferationsszenarien (horizontal wie vertikal). Die stärkste Variante besteht in der Vermeidung des Zugriffs auf kernwaffenrelevante Materialien an jedem Punkt des Technologieeinsatzes. Die Betonung liegt dabei auf technisch-intrinsischen Möglichkeiten für das Design von nuklearen Technologien und Anlagen, um eine große Hürde gegenüber dem denkbaren militärischen Gebrauch zu gewährleisten. Die institutionell-extrinsischen Möglichkeiten (wie beispielsweise *Safe-guards*) werden damit in fundamentaler Weise ergänzt, insbesondere auch, um deren inhärente Schwächen auszugleichen. Eine absolute Proliferationssicherheit („*proliferation proof*“) kann es angesichts der ambivalenten Natur nuklearer Forschung und Technologie allerdings nicht geben. Aber der erreichbare Grad an Proliferationsresistenz (auch in komparativer Hinsicht) kann ein wichtiges Kriterium für die Auslegung und Gestaltung oder auch die Auswahl nuklearer Technologien bzw. für Technologiepfadwahlen (im Energie- und Forschungsbereich) sein. Auch hier kommt eine weltweite Symmetrisierung in den Blick, die letztlich über die Chance auf eine proliferationsresistente Gestaltung den Technologiezugang für alle gleichermaßen öffnet und die Verhaltensregeln universell – und damit ohne Diskriminierung – verbindlich machen kann.

Mit Blick auf die Technologiedynamik (gerade auch hinsichtlich nuklearer Technologien) wird immer deutlicher, dass systematische Bemühungen um eine Antizipation von heute bereits absehbaren Gefährdungen aufgrund der wissenschaftlich-technologischen Dynamik notwendig sind. Neue technische Möglichkeiten, die nur durch intensive wissenschaftliche Forschung und eine mit hohem Aufwand verbundene Verwirklichung einer technologischen Konzeption erreichbar sind, dürfen nicht mehr unhinterfragt und ungeprüft realisiert werden. Eine Analyse der verfolgten Zielsetzungen und der Risiken sowie die Erarbeitung von Vorschlägen zu einer angemessenen Gestaltung unter Vermeidung von Gefährdungen und unter realistischer Prüfung der erwarteten und propagierten Vorteile ist dringend erforderlich. Ein Kernaspekt ist wiederum die Frage nach den Möglichkeiten einer rechtzeitigen und vorbeugenden proliferationsresistenten Gestaltung von erwünschten Technologien.

Insgesamt können alle soeben knapp vorgestellten drei Ansätze (Beseitigung von Waffensstoffen, Antizipation von technologisch bedingten Proliferationsrisiken, Proliferationsresistenz) als Teil einer Konzeption präventiver Rüstungskontrolle im Nuklearbereich aufgefasst werden. Frühzeitig und mit vorbeugender Absicht sollten geeignete Maßnahmen bedacht und dann auch ergriffen werden, die möglichst effektiv dem Ziel nuklearer Nichtverbreitung (d.i. Nichtweiterverbreitung und Abrüstung) dienen. Im Idealfall würden erwartbare oder bereits bestehende Gefährdungen auf der Ebene der Techniknutzung durch eine entsprechende Gestaltung von Politik sowie bereits im Bereich der Forschung und Technikentwicklung selbst bearbeitet, um ersichtliche oder absehbare Risiken so weit wie möglich präventiv zu vermeiden.

2 Eine Reaktion darauf war beispielsweise seit den 1970er Jahren die Entwicklung von einseitiger Exportkontrolle durch nukleare Lieferländer.

Fokussierung im bearbeiteten Projekt

Die Arbeit innerhalb des hier vorgestellten Projekts musste notwendigerweise weiter fokussiert werden. Innerhalb des Ansatzes der präventiven Rüstungskontrolle und der Erhöhung der Proliferationsresistenz wurde sie konzentriert auf zwei mögliche Lösungsansätze auf der technologischen Ebene im Rahmen hochrelevanter Problemstellungen nuklearer Nichtverbreitung. Diese stehen im direkten Zusammenhang mit der zentralen Rolle kernwaffenrelevanter Materialien:

- Auslotung von Pfaden zum Abbau von bestehenden Beständen an waffenrelevanten Spaltstoffen, d.h. insbesondere ihre möglichst unumkehrbare Beseitigung, bei möglichst weit gehender Beschränkung des zivilen Umgangs mit diesen.
- Die frühzeitige Analyse der proliferationsrelevanten Potentiale neuer oder neuartiger Nukleartechnologien (Zugriffsmöglichkeiten auf Waffensstoffe) mit dem Ziel, Gestaltungsmöglichkeiten aufzuzeigen, die ein Mehr an Proliferationsresistenz garantieren können.

Auf der Basis dieser Zielsetzung des Projektes wurden zwei konkrete beispielhafte Problemstellungen definiert, die innerhalb des Projekts in zwei Teilprojekten (A und B) bearbeitet wurden:

A: Optionen zur Plutoniumbeseitigung – Untersuchungen zu uranfreien Brennstoffen

Ziel dieses Teilprojektes war es, im Rahmen des Konzepts „Präventive Rüstungskontrolle“ Optionen für einen Umgang mit Plutoniumbeständen, die weltweit in erheblichen Mengen und in bereits separierter Form vorliegen, zu untersuchen. Dabei wurden gezielt zentrale technische Fragen zu einer bestimmten Variante der Plutoniumbeseitigung unter Nutzung uranfreier Brennstoffe (Inert Matrix Fuel - IMF) in existierenden Leichtwasserreaktoren untersucht. Diese könnten das Potential für eine möglichst weitgehende Eliminierung von Plutonium haben.³ Für diese Variante zur möglichst effizienten Plutoniumbeseitigung werden physikalisch-technische Informationen für eine Bewertung dieser Option zur Verfügung gestellt – vor allem zum Potential für eine irreversible Plutoniumbeseitigung sowie zur technischen Machbarkeit. Dabei ist zu klären, welche möglichen Vorteile gegenüber anderen reaktorgestützten Pfaden zur Plutoniumbeseitigung bestehen. Insbesondere steht ein Vergleich mit der Option der Uran-Plutonium-Mischoxidbrennstoffe (MOX)⁴ an, für die im zivilen Bereich bereits Erfahrungen vorliegen.

Im Rahmen des Projekts werden sowohl die im zivilen als auch im militärischen Bereich vorliegenden Bestände untersucht. Als Basis für eine Bewertung von IMF im Vergleich mit MOX-Brennstoff sind umfangreiche neutronenphysikalische Simulationsrechnungen solcher Brennstoffe notwendig. Zu diesem Zweck ist im Rahmen dieses Projekts das Programmsystem MCMATH, das gängige Monte-Carlo-Neutronentransportprogramme nutzt, neu entwickelt worden. Damit wird eine weitestgehend automatisierte Berechnung des Abbrandverhaltens und der Reaktivitätskoeffizienten einzelner Brennstoffe ermöglicht. Dabei geht es auch um die Analyse der technischen Randbedingungen für die Einsetzbarkeit bestimmter Brennstoffzusammensetzungen. Aufgrund der Ergebnisse der Simulationsrechnungen kann ein Vergleich von MOX-Brennstoff und IMF tatsächlich durchgeführt

³ Das durchgeführte Forschungsvorhaben konnte dabei auf einem vom BMBF geförderten Vorprojekt aufbauen, in dem die IMF-Option bereits als interessante Alternative zu Immobilisierungs- und anderen reaktorgestützten Optionen identifiziert und erste Berechnungen durchgeführt worden waren.

⁴ Hier werden einige Prozent Plutonium dem hauptsächlich aus Uran bestehenden MOX-Brennstoff hinzugefügt.

werden. Vor- und Nachteile dieser Strategien wurden anhand von Kriterien präventiver Rüstungskontrolle sowie daran angepasster physikalisch-technischer Indikatoren diskutiert und erste Bewertungen vorgenommen. Empfehlungen für die Politik schließen sich daran an.

B: Wege zur Erhöhung der Proliferationsresistenz von Spallationsneutronenquellen

Spallationsneutronenquellen (SNQ) sind die „modernen“ Neutronenquellen der Zukunft, die für Forschungszwecke eingesetzt werden. Sie werden voraussichtlich mittelfristig die Forschungsreaktoren (zumindest weitgehend) ersetzen. Bislang existiert keine umfassendere Analyse der Nichtverbreitungsaspekte von Spallationsquellen, obwohl offensichtlich ist, dass sie prinzipiell zur Erbrütung von kernwaffenrelevanten Materialien wie Plutonium, Uran-233 oder Tritium geeignet wären. Ein wesentliches Ziel dieses Teilprojektes ist es daher, diese Lücke zu schließen. Eine frühzeitige Abschätzung der proliferationsrelevanten Potentiale dieser Technologie soll einen exemplarischen Beitrag zur präventiven Rüstungskontrolle leisten. Dies ist durch die Überlegung motiviert, dass bei einer Weiterverbreitung und Weiterentwicklung der SNQ-Technologie ihre mögliche Nutzung für Kernwaffenzwecke mit weiterverbreitet wird.

Um diese Aufgabe anzugehen, werden Simulationsrechnungen für die mögliche Produktion von kernwaffenrelevanten Materialien in solchen Anlagen durchgeführt, wobei modernste Monte-Carlo-Neutronentransportprogramme im Hochenergiebereich zum Einsatz kommen. Einige relevante, denkbare Produktionsszenarien werden durchgespielt und ihre Relevanz für die Proliferationsproblematik analysiert. Dabei geht es zum einen um Umnutzungsmöglichkeiten von SNQs aus dem Forschungsbereich für die Waffenmaterialproduktion oder um den optimierten Einsatz von speziellen SNQs für die Materialproduktion. Andererseits geht es um Designfragen, die sich auf die Rolle des Spallationstargets beziehen, in dem die Neutronen produziert werden, und diejenige des Brutblankets, in dem die Materialproduktion stattfindet. Die Berechnungen für eine mögliche Plutoniumproduktion stehen dabei im Vordergrund, weil dies für die Weiterverbreitungsproblematik Priorität hat. Es werden aber auch Berechnungen für die mögliche Produktion von Tritium und Uran-233 durchgeführt.

An die Potentialanalyse schließen sich Überlegungen für Umgangsweisen mit der Proliferationsrelevanz von SNQs an. Dabei geht es zunächst um Maßnahmen im Bereich *Safeguards* (und Exportkontrolle), die bislang keine wesentliche Rolle in der Nichtverbreitungscommunity spielten, aber ebenso um Fragen der Technikgestaltung, die sich am Ziel einer verbesserten Proliferationsresistenz orientieren. Weiterhin werden Informationen zur Entwicklungsdynamik im Bereich der SNQs gegeben und ein Potentialvergleich mit Reaktoren in Hinblick auf die Waffenmaterialproduktion skizziert. Auf dieser Basis werden Empfehlungen für die Politik und für weitere Forschung formuliert.

Beide Teilprojekte liefern somit nicht nur Beiträge zu einer Konzeption präventiver Rüstungskontrolle, sondern ebenso zur Technikgestaltung, die am Kriterium der Proliferationsresistenz ausgerichtet ist.

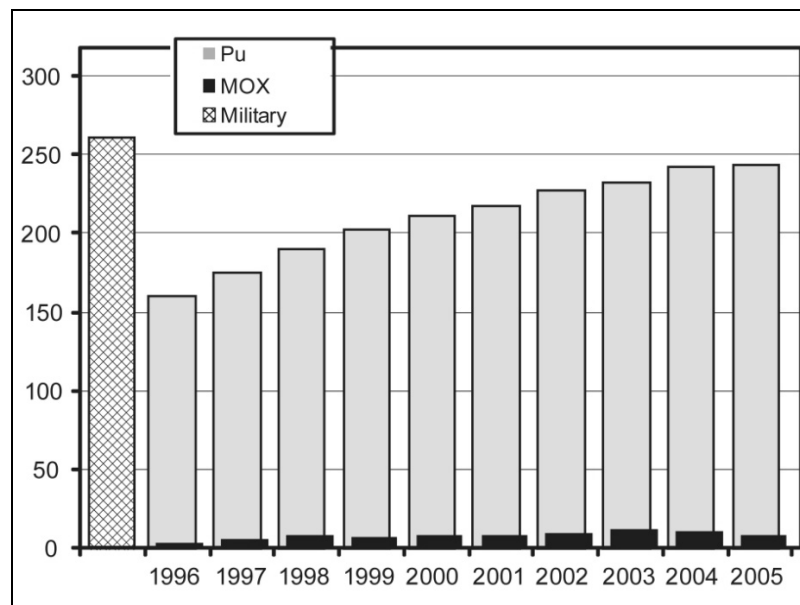
Um Lesern und Leserinnen, die mit technischen Details nicht so vertraut sind, die Lektüre zu erleichtern, sind so weit eben möglich die überwiegend technischen Ausführungen in drei Anhänge ausgegliedert. Innerhalb des Haupttextes finden sich von Zeit zu Zeit Informationskästen, die das Verständnis für die Hauptfragen und -Hintergründe erleichtern sollen.

2. Optionen zur Plutoniumbeseitigung – Untersuchungen zu uranfreien Brennstoffen

2.1 Einleitung

In der Phase des zu Ende gehenden Ost-West-Konflikts in den späten 1980er Jahren und darüber hinaus in den 1990er Jahren gab es Schritte zur nuklearen Abrüstung, die von den beiden dominierenden Kernwaffenstaaten USA und Sowjetunion bzw. Russland vereinbart wurden. In der Folge wurden in beiden Ländern große Mengen an Plutonium, die für militärische Zwecke produziert worden waren (sog. „Waffen-Plutonium“, WPu) und nun aus abgerüsteten Sprengköpfen frei gesetzt wurden, als „Überschuss“ deklariert, der in geeigneter Form einer Beseitigung zugeführt werden sollte. Gleichzeitig stagnierte im Bereich der zivilen Kernenergienutzung die ursprünglich geplante Verwendung von Plutonium als Brennstoff in Kernreaktoren – zum einen aufgrund des Einfrierens bzw. der Beendigung von nationalstaatlichen Programmen zur Errichtung schneller Brutreaktoren aufgrund der damit verbundenen erheblichen technischen Probleme, und zum anderen aufgrund der Unattraktivität der Plutoniumnutzung in gängigen Leichtwasserreaktoren. Gleichwohl wurde ein nicht unerheblicher Teil der anfallenden abgebrannten Brennelemente aus kommerziellen Kernenergieprogrammen einiger Länder wiederaufgearbeitet, so dass nach und nach eine große Halde an abgetrenntem Plutonium aus dem Reaktorbetrieb (sog. „Reaktor-Plutonium“, RPu) entstand. (Zu den Mengen vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Weltweit wachsende Plutoniumbestände von 1996 bis 2005



Plutoniumbestände bis zum Jahr 2005: Weltweit wachsende Bestände an separiert vorliegendem Plutonium im zivilen Bereich (grau) der Länder Belgien, China, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Japan, Russland, Schweiz, [IAEO-INFCIRC 549]. Ebenfalls dargestellt ist der jährliche Einsatz von Plutonium in MOX-Brennstoffen in Leichtwasserreaktoren (schwarz) und zum Vergleich die Plutoniumbestände im militärischen Bereich (schraffiert). (Die militärischen Überschussbestände der USA (45 t) werden in INFCIRC/549 zwar als zivil deklariert, werden in der obigen Abbildung jedoch weiterhin unter den militärischen Beständen aufgeführt.)

Die Plutoniummenge, die für militärische Zwecke produziert wurde und noch vorliegt, umfasst etwa 260 Tonnen. Theoretisch könnten damit etwa 50.000 Kernsprengköpfe bestückt werden. Die im zivilen Bereich angehäuften Plutoniummengen in bereits abgetrennter Form ist inzwischen auf fast dieselbe Menge angewachsen. „Waffen-Plutonium“ und „Reaktor-Plutonium“ unterscheiden sich zwar in ihrer Isotopenzusammensetzung aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte in Reaktoren, aber beide Formen sind für die Verwendung als spaltbares Material sowohl in Kernwaffen wie im Brennstoff von Reaktoren geeignet (vgl. genauer Info 2 und 4). Dies bedeutet auch, dass es kein einfaches Verfahren gibt, Plutonium waffenuntauglich zu machen, wie im Falle des ebenfalls in Kernwaffen eingesetzten hochangereicherten Urans (HEU). Letzteres kann durch Verdünnung mit Natururan oder abgereichertem Uran in schwach angereichertes Uran (*low enriched uranium*, LEU)⁵ überführt werden, welches damit praktisch nicht mehr als Spaltstoff für Kernwaffen verwendbar ist, wohl aber als Brennstoff für Leichtwasserreaktoren.

Dieser Umstand ist von großer Bedeutung, denn offensichtlich müssen technische Lösungen für einen geeigneten Umgang mit Plutonium gefunden werden, so dass eine Verwendung oder Wiederverwendung in Kernwaffen so weit eben möglich ausgeschlossen werden kann. Naturwissenschaftlich-technische Überlegungen zu Umgangs- bzw. Beseitigungsstrategien für Plutonium sind also eine absolute Notwendigkeit, ohne die politisch-institutionelle Überlegungen, die sicherlich ebenfalls wesentlich sind, nicht zielführend erdacht und umgesetzt werden können [Liebert und Pistner 2001].

Info 3

Technische Optionen zum Abbau vorliegender Plutoniumbestände (vgl. [Liebert und Pistner 2001a, Liebert und Pistner 2001b]):

Immobilisierung: Bei der als Immobilisierung bezeichneten Option sollen vorliegende Plutoniumbestände direkt in eine endlagerfähige Form überführt werden, so dass das enthaltene Plutonium nur schwer wieder zugänglich ist. Dazu wird das Plutonium – typischerweise zusammen mit hochradioaktiven Materialien aus der Wiederaufarbeitung – in eine Matrix aus Glas oder Keramik eingebracht. Etwas längerlebige Spaltprodukte (wie Cäsium-137 mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren) sollen für eine Strahlenbarriere sorgen, die ein direktes Hantieren mit den Abfallgebinden für etwa 100 Jahre* (oder mehr) verhindert. Neben der direkten Verglasung wurde auch das sog. *Can-in-Canister*-Verfahren in die Diskussion gebracht. Hier wird das Plutonium zuerst in speziellen Keramiken eingedost und diese dann in größeren Abfallbehältern zusammen mit radioaktivem Abfall verglast.

MOX-Pfad: Hier werden einige Prozent Plutonium als Spaltmaterial dem Uranbrennstoff beigemischt. Bei dieser Reaktoroption, für welche existierende Leistungsreaktoren genutzt werden können, wird ein Teil des Plutonium (ungeradzahlige Isotope) innerhalb des Uran-Plutonium-Mischoxids (MOX) Brennstoffs gespalten und damit reduziert, aber gleichzeitig wird neues Plutonium durch die Bestrahlung des enthaltenen Urans im Reaktor produziert.

IMF-Pfad: Eine spezielle Reaktoroption – ebenfalls unter Verwendung gängiger Leistungsreaktoren – könnte die Verbrennung von Plutonium in sogenannten uranfreien Brennstoffen (Inert Matrix Fuel, IMF) sein. Diese bestehen aus einer möglichst nicht mit Neutronen wechselwirkenden (inerten) Matrix, in die das Plutonium eingebettet ist. Da diese Brennstoffe kein Uran enthalten, wird bei Einsatz im Reaktor kein neues Plutonium erzeugt, sondern ausschließlich das anfänglich vorhandene Plutonium durch Spaltung umgesetzt.

Bei allen Reaktoroptionen ist das verbleibende Plutonium nach Durchlauf durch den Reaktor ebenfalls durch eine Strahlenbarriere geschützt, da es in abgebrannte Brennelemente eingebettet ist. Die abgebrannten Brennelemente sollen nach einer Zwischenlagerzeit in ein Endlager für radioaktive Abfälle verbracht werden. Dasselbe gilt für das verglaste Plutonium (Immobilisierungsoption).

*Die Strahlenbarriere (Gammadosis) in 1 Meter Abstand beträgt ungefähr 10 Sievert pro Stunde (die tödliche Dosis LD_{50/50} nach IAEA beträgt ca. 4 Sv), nach 100 Jahren noch 1 Sievert pro Stunde und nach 200 Jahren noch 0,1 Sievert pro Stunde (für abgebrannte Brennelemente ist die Strahlendosis etwa 4-mal so hoch).

5 LEU ist gemäß international anerkannter Definition Uran mit einem Anreicherungsgrad von weniger als 20% Uran-235 im Gesamturan.

Die Zielsetzung, vorliegende Plutoniumbestände beseitigen zu wollen, liegt in der Problematik begründet, dass solche Bestände entweder in Kernwaffenstaaten für neue Kernwaffen wieder verwendet oder dass gewisse Mengen für den Bau von Kernwaffen in anderen Staaten (oder gar für terroristische Zwecke) abgezweigt werden könnten. Diese Problematik wird dadurch verschärft, dass die Diskrepanzen bei Plutonium-Buchführung und -inventarisierung so groß sind, dass letztlich keine Sicherheit darüber herrscht, ob gewisse Plutoniummengen in Abfallströme gelangt, verschwunden, „nur“ falsch bilanziert oder abgezweigt worden sind. Letzteres wurde in drastischer Weise durch eine vom US-Energieministerium veröffentlichte eigene Plutoniumbilanz deutlich, die Unsicherheiten bzgl. der Bestände im Tonnenmaßstab offen legte [DoE 1996].

Zum Umgang mit vorliegenden Plutonium-Beständen wurden seit den 1990er Jahren eine Reihe verschiedener technischer Optionen vorgeschlagen. In diesem Kontext veröffentlichte umfangreiche Studien [CISAC 1994, CISAC 1995] beziehen sich vorrangig auf die Diskussion der Beseitigung von überschüssigem „Waffen-Plutonium“. Dabei geriet jedoch auch die Frage des Umgangs mit den erheblichen Überschüssen an „Reaktor-Plutonium“ in den Blick. Der Großteil des abgetrennt vorliegenden Plutonium im zivilen Bereich (vgl. Abbildung 1) liegt in Europa. Im Zuge des in Deutschland beschlossenen Ausstiegs aus der Atomenergienutzung begann auch hier eine Diskussion über den Umgang mit vorliegenden Plutoniumbeständen, die bezogen auf das Jahr 2000 durchaus Mengen von bis zu 50 Tonnen hätten umfassen können.⁶ Das Problem der Plutoniumbestände und die Suche nach Wegen zu ihrer Beseitigung wurde für die Mengen in deutscher Verantwortung zunehmend thematisiert; darüber hinaus kamen weitere europäische oder russische „Reaktor-Plutonium“-Lager in den Blick [Royal Society 1998, Küppers et al. 1999, FZJ 2000, DPG 2000, Liebert und Pistner 2001, Barleon et al. 2004, Royal Society 2007].

Die Bewertung der verschiedenen Verfahren zur Plutoniumbeseitigung (vgl. Info 3) fällt allerdings nicht einheitlich aus. Nachdem ursprünglich in den USA für die dortigen WPu-Bestände ein „*Dual-track-approach*“ favorisiert und beschlossen wurde, der neben der Entwicklung von reaktorgestützten Optionen auch eine Immobilisierung des Plutoniums durch Einbettung in eine Glas- oder Keramikmatrix zusammen mit radioaktiven Abfällen vorsah, kam es im Jahr 2002 zu einem Einfrieren der Arbeiten an den Immobilisierungsverfahren. Bis heute ist daher lediglich eine Umsetzung von Plutonium als Uran-Plutonium-Mischoxidbrennstoff (MOX) in Leichtwasserreaktoren großtechnisch prinzipiell einsatzfähig. Allerdings sind auch die bisherigen Pläne der USA zu Errichtung und Betrieb einer MOX-Anlage in beträchtlichem zeitlichem Verzug und erweisen sich bereits jetzt als erheblich teurer als ursprünglich geplant [DoE 2005]. Darauf soll später nochmals genauer eingegangen werden.

2.2 Bedeutung der Plutoniumbeseitigung für präventive Rüstungskontrolle und die verfolgte Fragestellung

Alle fünf etablierten Kernwaffenstaaten verwenden Plutonium als wichtiges spaltbares Material in ihren Kernwaffenarsenalen. Daneben haben Israel und Indien ihre Kernwaffenfähigkeit über den Aufbau von Produktionskapazitäten für Plutonium erreicht. Andere Staaten wurden oder werden verdächtigt, über den Zugriff auf Plutonium eine Waffenkapazität aufbauen zu wollen, beispielsweise aktuell Nord-Korea, früher Irak und Brasilien, aber in den sechziger und siebziger Jahren auch einige westeuropäische Staaten [Spector et

⁶ Vgl. [Kalinowski et al. 2002]. Die noch zu beseitigende Gesamtmenge an abgetrenntem Plutonium bezieht sich hier auf die im Jahr 2002 noch bekanntermaßen abzuarbeitenden Wiederaufarbeitungsverträge mit den französischen und britischen Anlagenbetreibern sowie den kumulativen Anfall an abgetrenntem Plutonium ab dem Jahr 2000.

al. 1995]. Schon kleine Mengen an Plutonium – im Bereich weniger Kilogramm – reichen als Spaltstoffmenge für einen Kernsprengkörper aus.

Angesichts der in vielen Ländern vorliegenden Plutoniumbestände gilt es aus der Perspektive der präventiven Rüstungskontrolle, vorausschauend und noch rechtzeitig Maßnahmen für eine effektive Nichtverbreitungspolitik zu ergreifen [FONAS 2001, Liebert 2005]. Ein Ziel muss dabei sein, die Verwendung oder Wiederverwendung von Plutonium für Kernwaffenzwecke so sicher wie möglich auszuschließen. Irreversibilität der Abrüstung durch Beseitigung der aus den abgerüsteten Sprengköpfen freigesetzten Spaltstoffe und eine gezielte Effektivierung der Bemühungen um Nichtweiterverbreitung sind wesentliche Bestandteile eines Konzeptes präventiver Rüstungskontrolle. Zentrale und bereits heute absehbare zukünftige Gefahren für die internationale Stabilität werden dabei bewusst in den Blick genommen.

Ein Weg, der bereits innerhalb des nuklearen Nichtweiterverbreitungsregimes beschritten wird und den Zugriff auf Plutonium für Waffenzwecke erschweren will, besteht in politisch-institutionellen Maßnahmen. Die Bestände an Plutonium bestehen dabei weiter fort oder dürfen sogar weiter anwachsen, aber es wird versucht, den Anreiz für einen solchen Zugriff zu senken bzw. durch die Gefahr einer rechtzeitigen Entdeckung von außen die mit ihm verbundenen (politischen) Nachteile soweit zu erhöhen, dass ein solcher Versuch nicht unternommen wird. Dazu gehören IAEA-Safeguards oder die Vereinbarungen der neun Staaten mit bestehendem Plutoniumumgang [IAEO-INFIRC 549].

Ein weiterer Weg, der den Zugriff auf Plutonium weitestgehend ausschließen will, besteht in technisch-intrinsischen Maßnahmen. Die Möglichkeit bzw. Gelegenheit für einen unerwünschten Zugriff für die Waffenfertigung selbst soll eingeschränkt und nicht nur das Risiko für die Entdeckung eines solchen Zugriffs erhöht werden. Die naturwissenschaftlich-technischen Gegebenheiten selbst – als Grundlage für politisch motivierte Absichten müssen dazu in den Blick genommen werden. Während institutionelle Maßnahmen weitestgehend auf einer aktiven Überwachung bzw. Kontrolle der Nichtabzweigung von Plutonium durch staatliche Stellen beruhen, soll im Rahmen dieses Konzepts durch technisch-intrinsische Maßnahmen der Zugriff auf Plutonium zusätzlich durch wirkungsvolle Barrieren erheblich erschwert werden, die unabhängig von aktiven Maßnahmen wirksam sind. Eine schnelle und wirksame Reduktion der zugreifbaren Mengen und idealerweise eine Reduktion der Plutoniummengen selbst werden dabei angestrebt. Dies bedeutet insbesondere, das Plutonium in eine physikalisch-chemische Form zu überführen, die eine Verwendung für Kernwaffenzwecke möglichst ausschließt bzw. erheblich erschwert. Hierzu kann primär eine möglichst hohe Strahlungsbarriere⁷ dienen, die durch hochradioaktive Spaltprodukte erzeugt werden kann, wie sie in der heute gängigen Nuklearenergienutzung (und in den Waffenprogrammen der Vergangenheit) anfallen bzw. angefallen sind. In Kombination mit institutionellen Maßnahmen soll damit vorbeugend das Proliferationsrisiko deutlich vermindert werden. Eine Wirksamkeit dieser Vorgehensweise ist bewusst nicht nur in Hinblick auf staatliche Akteure, sondern auch auf substaatliche Akteure angestrebt.⁸

Angesichts der großen Mengen an bereits in abgetrennter Form vorliegendem Plutonium (die Mengen im militärischen und im zivilen Bereich sind theoretisch jeweils ausreichend für etwa 50.000 Kernsprengkörper) ist es das Ziel dieses Teilprojektes, zentrale technische

7 Gemeint ist eine Barriere gegen einen direkten Zugriff, die durch eine erhebliche radioaktive Strahlung erzeugt wird, die von den plutoniumhaltigen Gebinden ausgeht (vgl. Info 3).

8 Weitere denkbare Maßnahmen, die den Zugriff auf Plutonium zumindest erschweren bzw. den notwendigen Zeitaufwand und technischen Aufwand zur Vorbereitung von Plutonium für eine waffentechnische Verwendung erhöhen könnten, wären die Änderung der physikalisch-chemischen Form, z. B. durch eine Mischung mit Neutronenabsorbieren oder auch eine Einbettung in große und schwere Gebinde, welche dann direkt einer späteren Endlagerung zugeführt werden könnten.

Fragen zu einer bestimmten reaktorgestützten Variante der Plutoniumbeseitigung unter Nutzung uranfreier Brennstoffe (Inert Matrix Fuel - IMF) in existierenden Leichtwasserreaktoren zu untersuchen. Uranfreie Brennstoffe (inert matrix fuel, IMF) befinden sich seit einigen Jahren weltweit in Entwicklung [Akie 1994], [Degueldre 2003], [IMF10 2006]. Diese Variante hat das Potential für eine möglichst weitgehende Eliminierung von Plutonium und sorgt gleichzeitig für die erwünschte Strahlungsbarriere. Während sich die bislang durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung von IMF schwerpunktmäßig auf die Herstellung und die Qualifikation geeigneter Brennstoffe konzentriert haben, wird in den hier durchgeführten Untersuchungen ein wesentlicher Schwerpunkt auf die Optimierung der anfänglich ausgewählten Brennstoffzusammensetzung hinsichtlich des Potentials zur Reduzierung des eingebrachten Plutoniums gelegt. Die IMF-Option könnte sich alternativ zum heute in einigen Ländern im zivilen Bereich etablierten MOX-Pfad als technisch sinnvoll und machbar herausstellen.

Als Basis für eine Bewertung von IMF im Vergleich mit MOX-Brennstoff sind umfangreiche neutronenphysikalische Simulationsrechnungen solcher Brennstoffe notwendig. Dazu ist im Rahmen dieses Projekts das Programmsystem MCMATH entwickelt worden [Pistner 2006], welches eine weitestgehend automatisierte Berechnung des Abbrandverhaltens und der Reaktivitätskoeffizienten einzelner Brennstoffe ermöglicht. Anhand der damit durchgeführten Berechnungen wird ein kriteriengeleiteter Vergleich von MOX-Brennstoff und IMF durchgeführt.

2.3 Aktuelle Situation im Bereich Plutoniumbestände und Plutoniumumgang

Die Frage der Plutoniumbeseitigung ist hoch relevant. Spätestens seit große Mengen von Plutonium, das aus der Abrüstung von nuklearen Sprengköpfen stammt, zu Überschuss erklärt ist, und seit den US-russischen Vereinbarungen über eine Beseitigung eines Teils dieser Plutoniumbestände ist deutlich geworden, dass die vorliegenden Mengen im militärischen Bereich Schritt für Schritt beseitigt werden müssen. Weiterhin stellt die inzwischen praktisch genauso große – und weiter anwachsende – Plutonium-Halde im zivilen Bereich eine erhebliche Gefahr für den Weltfrieden dar [Chauvistré und Pistner 2005].

Eine genaue Bestimmung der weltweit in bereits abgetrennter Form vorliegenden Plutoniumbestände ist heute nicht möglich. Es liegen jedoch verschiedene offizielle Angaben sowie Abschätzungen zu den Beständen vor, wobei die Genauigkeit der entsprechenden Aussagen je nach Land stark schwanken kann. Die militärischen Bestände liegen heute im Bereich von etwa 260 Tonnen WPu (vgl. Abb. 1). 107 Tonnen davon haben die USA, Russland und Großbritannien als Überschuss über die gegenwärtig benötigten Mengen deklariert. Für 68 Tonnen aus diesen überschüssigen Beständen wurde zwischen den USA und Russland im Jahr 2000 ein Abkommen zur Beseitigung über ein Zeitraum bis 2030 unterzeichnet.⁹

Russland will demnach seine 34 Tonnen WPu zu MOX-Brennstoffen verarbeiten und überwiegend in ihren Leichtwasserreaktoren vom Typ WWER 1000 einsetzen; ein kleinerer Teil soll in einem Schnellen Brutreaktor (BN-600) verwendet werden. In den USA war ursprünglich vorgesehen, 25,6 Tonnen zu MOX-Brennstoff zu verarbeiten und in kommerziellen Leichtwasserreaktoren einzusetzen; 8,4 Tonnen, die aufgrund von Unreinheiten für nicht reaktorfähig gehalten wurden, sollten nach dem *Can-in-Canister*-Verfahren (vgl. Info 3) immobilisiert werden.

⁹ „Agreement Between the Government of the United States of America and the Government of the Russian Federation Concerning the Management and Disposition of Plutonium Designated as No Longer Required for Defense Purposes and Related Cooperation“, 2000.

Info 4

Waffenfähigkeit von Plutonium:

Die Isotopenzusammensetzung, also das Mischungsverhältnis der Plutoniumisotope (man spricht auch vom Isotopenvektor) hängt stark von der Dauer und Art der Bestrahlung des Ausgangsstoffs Uran (z.B. als Reaktor-Brennstoff) ab (vgl. Info 2). Der Isotopenvektor von vorliegenden Beständen an „Reaktor-Plutonium“ (RPu) im zivilen Bereich, die in verschiedenster Weise im Betrieb von Leistungsreaktoren entstanden sind, kann daher stark variieren und er unterscheidet sich von der Zusammensetzung von „Waffen-Plutonium“ (WPu), dass speziell für Kernwaffen produziert wurde.

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
WPu	0,05%	93,60%	6,00%	0,30%	0,05%
typisches RPu	1,80%	59,00%	23,00%	12,20%	4,00%
Spaltwahrscheinlichkeit für schnelle Neutronen	95,3%	97,1%	93,6%	93,3%	92,8%
Halbwertszeit (Jahre)	87,7	24.100	6.560	14,4	376.000
Wärmerate (W/kg)	560	1,9	6,8	4,2	0,1
Neutronenrate (n/s g)	2.600	0,022	910	0,049	1.700

Aus der Tabelle lässt sich zunächst ablesen, dass alle Plutoniumisotope durch schnelle, energiereiche Neutronen, wie sie innerhalb einer Kernwaffe vorkommen, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gespalten werden können (entscheidender Unterschied zum U-238). Militärisch findet typischerweise ein Isotopenvektor mit einem Anteil von etwa 93% Pu-239 Verwendung, da man unerwünschte Effekte durch andere Plutoniumisotope vermeiden will. Dies betrifft zum einen die Wärmeentwicklung durch radioaktiven Zerfall, insbesondere im Isotop Pu-238. Die Wärmewirkung könnte im Extremfall die konventionellen Sprengstoffe innerhalb der Waffenanordnung untauglich machen. Entsprechende Vorkehrungen zur Wärmeabfuhr oder zur vorherigen Kühlung des Spaltstoffs könnten also notwendig werden. Grundsätzlich wird heute jedoch nur bei einem sehr hohen Anteil des Isotops Pu-238 (>80%), das für einige Anwendungen speziell erzeugt wird, entsprechendes Plutonium von der Notwendigkeit von *Safeguards* ausgeschlossen. Weiterhin beeinträchtigt auch die vergleichsweise hohe Wahrscheinlichkeit der spontanen Spaltung von Pu-238, Pu-240 und Pu-242 (geradzahlige Plutoniumisotope) die Waffenfähigkeit. Durch diese Spontanspaltung – insbesondere Pu-240 ist hier relevant – entstehen Neutronen, die die Kettenreaktion im Spaltstoff starten können, bevor eine optimale Kompression durch die konventionellen Sprengstoffe erzeugt ist. Die Wahrscheinlichkeit für eine solche Frühzündung ist abhängig von der Höhe des Neutronenhintergrunds aufgrund von Spontanspaltungen.

Jedoch gilt es mittlerweile als erwiesen, dass im Prinzip alle Plutoniumzusammensetzungen in Kernwaffen verwendet werden können und dass selbst im Falle einer solchen Frühzündung einer Kernwaffe mit „Reaktor-Plutonium“ noch ausreichend Sprengkraft mit verheerender Wirkung freigesetzt würde [Kankeleit 1989, Mark 1993, CISAC 1994, Gilinsky 2004]. Eine Waffe aus schlechter geeignetem Material wäre – in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Waffentechnik – weniger effizient und zuverlässig bezüglich der zu erreichenden Detonationswirkung. Eine Nuklearwaffe mit dem waffentechnischen *Know-How der Trinity Test*explosion (1945) hätte selbst im ungünstigsten Fall einer Frühzündung noch eine Explosionswirkung entsprechend mindestens 1.000 Tonnen des herkömmlichen Sprengstoffs TNT (1 kt TNT), etwa einem Zwanzigstel der Explosion der Nagasaki-Bombe.

Beide Seiten müssen die notwendigen Technologien noch bis zur Einsatzreife weiter entwickeln bzw. importieren. Mit fertigen MOX-Brennstofffabriken wurde für 2007 bzw. 2009 gerechnet. Kostenschätzungen lagen bei 2 Mrd. Dollar für das russische Programm und etwa 4 Mrd. Dollar für das US-amerikanische.

Nach 2001 wurden die notwendigen Finanzmittel durch die Bush-Administration deutlich gekürzt und die verbliebenen Mittel vollständig in den MOX-Bereich übertragen, so dass die verfolgte Immobilisierungsoption zur Zeit auf Eis gelegt ist. Allerdings wäre sie nach letztem Stand der Arbeiten grundsätzlich innerhalb weniger Jahre einsatzfähig. Erhebliche zeitliche Verzögerungen gepaart mit einer Kostenexplosion sind in beiden Ländern zu verzeichnen. Nunmehr wird mit Kosten von über 4 Mrd. Dollar in Russland und mehr als 10 Mrd. Dollar in den USA gerechnet.¹⁰ Der Zeitplan verschiebt sich in Russland auf einen

10 Vgl. Joint US-Russian Working Group on Cost Analysis and Economics in Plutonium Disposition "Analysis of Russian-Proposed Unified Scenario for Disposition of 34 Metric Tons of Weapon-Grade Plutonium", 2006.

Start der MOX-Fertigung im Jahr 2018 und ein Ende des Programms im Jahr 2040. In den USA wird ein Start der MOX-Fertigung nunmehr für 2016 angesetzt. Die versprochene und unverzichtbare finanzielle Unterstützung der G8-Länder für das russische Programm, bei dem bislang auf dem MOX-Pfad bestanden wird,¹¹ lässt zu wünschen übrig (nur etwa 850 Mill. Dollar sind bislang zusammen gekommen – davon stammt die Hälfte aus den USA). Bald zwei Jahrzehnte nach Ende des Kalten Krieges ist bis heute noch kein Gramm russischen oder US-amerikanischen Waffen-Plutoniums beseitigt worden.

Bezüglich ihrer im zivilen Bereich vorliegenden Plutonium-Bestände haben neun Plutonium nutzende Länder 1998 verabredet, in einem jährlichen Bericht eine Zusammenfassung zu vorliegenden Beständen zu veröffentlichen [IAEO-INFCIRC 549]. Für diese Länder können daher einigermaßen verlässliche Angaben zu den Gesamtmengen gemacht werden. Danach wird im zivilen Bereich etwa dieselbe Menge RPu in bereits abgetrennter Form gelagert wie im militärischen Bereich, wobei diese Menge in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen ist (vgl. Abbildung 1). In Großbritannien lagert die größte Einzelmenge von etwa 100 Tonnen. Dies hat die Royal Society dazu veranlasst, ein Dringlichkeitsprogramm für ihre Beseitigung einzufordern [Royal Society 1998 und 2007]. Auf die Notwendigkeit, die Plutoniummengen in deutscher Verantwortung im Rahmen des Atomausstiegs zu beseitigen, wurde in Abschnitt 3.1. bereits hingewiesen. Hierzu wird gegenwärtig die MOX-Option genutzt.

Info 5

Wirtschaftlichkeitsaspekte der Plutoniumnutzung in Reaktoren:

Seit den 1990er Jahren sind wiederholt Studien vorgelegt worden [OECD/NEA 1994, Hensing und Schulz 1995, Chow 1996, Charpin et al. 2000], die eine Unwirtschaftlichkeit der Plutonium-Wiederverwertung in Reaktoren belegen (vgl. aus neuerer Zeit insbes. [Bunn et al. 2003]). Dies ist nicht allein durch die Kosten für die Wiederaufarbeitung des abgebrannten Brennstoffs bedingt, sondern mindestens ebenso durch die Kosten für die MOX-Brennstoff-Fertigung. Aufgrund der im Vergleich zu Uran höheren Radioaktivität von Plutonium, seiner geringeren kritischen Masse und der Notwendigkeit, den Gefahren einer Abzweigung für Waffenzwecke vorzubeugen, ist der Umgang mit Plutonium im Vergleich zur Verwendung von niedrig angereichertem Uran mit beträchtlichem Aufwand verbunden, der sich auch in den Kosten für die Herstellung und Verwendung von MOX-Brennstoff im Vergleich zu Uran-Brennstoff klar bemerkbar macht.

Die Analysen zeigen, dass die Verwendung von Plutonium als Mischoxidbrennstoff in der zivilen Kernenergienutzung unter den heute gegebenen und auf lange Sicht erwartbaren Rahmenbedingungen deutlich teuer ist als die Verwendung von Uran-Brennstoff mit anschließender direkter Endlagerung der abgebrannten Brennstäbe. Unter recht konservativen Annahmen, u.a. über den Preis für die Wiederaufarbeitung (1.000 \$/kg SM) und für die MOX-Fertigung (1.500 \$/kg SM), würde die MOX-Nutzung in Leichtwasserreaktoren erst wirtschaftlich, wenn der Uranpreis 360 \$/kg übersteigt, was für die kommenden Jahrzehnte nicht zu erwarten ist. Ähnliches gilt für eine theoretisch denkbare Nutzung in Schnellen Brütern, wobei eine Reihe von zusätzlich anfallenden Entwicklungs- bzw. Betriebskosten (z.B. für die Wiederaufarbeitung) noch nicht angemessen berücksichtigt werden konnten.

Weltweit werden zurzeit nur etwa 10t Plutonium pro Jahr wieder als MOX-Brennstoff in dafür geeigneten Leichtwasserreaktoren (LWR) eingesetzt. Nachdem die so jährlich umgesetzte Menge Anfang der 2000er Jahre deutlich zugenommen hatte, ist diese Rate seit 2004 sogar wieder rückläufig. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Nutzung plutoniumhaltiger MOX-Brennstoffe für die Betreiber völlig unwirtschaftlich ist (siehe Info 5).¹² Dennoch geht die Wiederaufarbeitung von Brennstoffen und damit die Abtrennung von Plutonium in den großen Wiederaufarbeitungsanlagen weiter, so dass die separierten Plutoniumbestände weltweit weiter anwachsen.

¹¹ Dabei spielt eine Rolle, dass sich die russische nukleare Community offenbar einen Einstieg in eine groß-skalierte Plutoniumwirtschaft über die technologische Basis des Plutoniumbeseitigungsprogramms erhofft.

¹² Lediglich in Deutschland ist der MOX-Einsatz kontinuierlich höher (im Bereich von 1,5 bis 3 Tonnen Plutonium Einsatz pro Jahr in den letzten Jahren). Dies ist nicht ökonomisch bedingt, sondern ergibt sich aus der Verpflichtung, abgetrenntes Plutonium vor der Stilllegung aller deutschen Reaktoren, die sukzessive bis ca. 2021 vorgesehen ist, in Reaktoren wieder zu verwerten.

Einen besonderen Engpass für den Abbau von Plutoniumbeständen stellen die vorhandenen Anlagen zur MOX-Herstellung dar. Anfang 2004 standen weltweit nur wenige kommerzielle Anlagen zur Verfügung. Größere Anlagen existierten nur in Frankreich, Belgien und Großbritannien. Nach Schließen einer kleineren Anlage ist die in Deutschland 1991 praktisch fertig gestellte Brennelementfabrik der Firma Siemens in Hanau nicht in Betrieb gegangen. Japan plant die Errichtung einer großen Anlage, die 2009 in Betrieb gehen soll. Auch im Rahmen der Entsorgung von WPU-Beständen ist sowohl in den USA als auch in Russland die Errichtung neuer Anlagen zur MOX-Produktion vorgesehen, deren Kapazität zur Beseitigung von 34 t Plutonium bis 2030 (bzw. nunmehr 2040) ausreichen soll. Insgesamt standen damit Anfang 2004 Anlagen mit einer Verarbeitungskapazität von ca. 10–14 t Plutonium pro Jahr zur Verfügung, die aber offenbar nicht voll genutzt wurde. Mit der Inbetriebnahme der britischen Anlage SMP sollte sich dieser Wert auf 16–23 t/a erhöhen. Gegenwärtig wird jedoch aufgrund der erheblichen technischen Probleme beim Betrieb der Anlage davon ausgegangen, dass die SMP-Anlage maximal etwa 40% ihrer ursprünglich geplanten Kapazität, eher sogar noch deutlich weniger, erreichen wird. Eine weitere Steigerung des Produktionspotentials ist erst wieder zu erwarten, wenn die geplante japanische Anlage oder Anlagen in den USA und Russland erfolgreich in Betrieb gehen sollten.

Im Bereich der Verglasung bzw. Immobilisierung (siehe Info 3) liegen eine Reihe von Erfahrungen durch die laufende Praxis der Verglasung radioaktiver Abfälle aus Wiederaufarbeitungsanlagen vor, nicht aber für die Wiedereinbettung von Plutonium in solche Abfallgebinde. Es existieren jedoch Machbarkeitsstudien. Darauf soll im Rahmen dieses Berichts, der sich auf reaktorgestützte Optionen konzentriert, nicht näher eingegangen werden.¹³

2.4 Bewertungskriterien für Optionen der Plutoniumbeseitigung und Methodik der Untersuchungen

Aufgrund seiner potenziellen Rolle als kernwaffenfähiges Material sind bei Optionen zum Umgang mit Plutonium insbesondere Aspekte der nuklearen Nichtverbreitung (unter Einschluss der anzustrebenden Irreversibilität nuklearer Abrüstung) zu berücksichtigen. In der Vergangenheit wurde eine große Zahl verschiedener Optionen für den Umgang mit Plutonium untersucht. Wir beschränken uns in diesem Projekt auf reaktorgestützte Optionen zur Plutoniumbeseitigung, die heute bereits realistisch umsetzbar sind.

Für eine vergleichende Bewertung verschiedener Optionen des Plutoniumumsatzes in Reaktoren ist es notwendig, bereits vorliegende Kriterien der präventiven Rüstungskontrolle [FONAS 2001] bis hin zu technisch formulierten quantifizierbaren Indikatoren weiter zu entwickeln. Damit soll ein Vergleich der verschiedenen reaktorgestützten Optionen (bisher verfolgte MOX-Nutzung versus neuartige IMF-Variante) erfolgen. Gleichzeitig kann durch eine solche kriteriengeleitete Bewertung auch eine Optimierung von IMF-Brennstoffkonzepten in Hinblick auf das proliferations- und abrüstungspolitische Ziel unterstützt (oder gar erreicht) werden.

¹³ Vgl. ausführlicher in [Pistner und Liebert 2001, Barleon et al. 2004]

Auf dieser Basis wurden im Rahmen dieses Projektes folgende Kriterien identifiziert:

- technische Machbarkeit
- politisch-gesellschaftliche Akzeptanz
- Umwelt- und Sicherheitsaspekte
- Aspekte der nuklearen Nichtverbreitung (inkl. Abrüstung) und
- der Wirtschaftlichkeit.

Hieraus sind wichtige Indikatoren für den Vergleich von MOX-Brennstoff und IMF abgeleitet worden. In Bezug auf die technische Machbarkeit sind dies Aspekte der Reaktivitätskontrolle; für die Gewährleistung der Sicherheit des Anlagenbetriebs sind abbrandabhängige Werte von sogenannten Reaktivitätskoeffizienten relevant (s.u.). Aus Kostengründen und in zeitlicher Perspektive spielt der erreichbare Gesamtumsatz bei einer vorgegebenen Reaktor- bzw. Brennstoffherstellungskapazität eine wichtige Rolle.

Für die bedeutende Frage der Bewertung von Nichtverbreitungseigenschaften ist das Kriterium der Proliferationsresistenz wesentlich. Zentral sind hierbei für den Vergleich verschiedener Reaktorooptionen die erreichbare Plutoniumreduktion (also der erreichbare Eliminierungsgrad) und die Durchsatzmenge. Weitere wichtige Indikatoren sind die im abgebrannten Brennstoff verbleibende Plutoniummenge, deren Konzentration sowie die Isotopenzusammensetzung des verbleibenden Plutoniums. Letztere bestimmt die Attraktivität des verbleibenden Plutoniums für potentielle Waffenanwendungen. Als Indikatoren hierfür dienen die Wärmerate sowie der Neutronenhintergrund des im abgebrannten Brennstoff verbleibenden Plutoniums, welche die Waffentauglichkeit dieses Restplutoniums reduzieren können (vgl. Info 4).

Um zu Aussagen hinsichtlich dieser Indikatoren zu kommen, müssen abbrandabhängige Eigenschaften von MOX-Brennstoffen und IMF bestimmt werden. Dies ist mit existierenden Computerprogrammen für die Berechnung der Brennstoffzusammensetzung im Laufe des Abbrands (Zell-Abbrandprogramme) nicht ohne weiteres möglich, da deren Datenbasis zumeist für konventionelle Uran- bzw. MOX-Brennstoffe erstellt wurde. Daher wurde im Rahmen dieses Projekts das Programmsystem MCMATH entwickelt und validiert. Das Programmsystem MCMATH basiert auf einer Kopplung des Neutronentransportprogramms MCNP [Waters 2002, Pelowitz 2005] mit Mathematica-Routinen. Dabei dient *Mathematica* zur Berechnung der zeitabhängigen Brennstoffzusammensetzung auf der Basis der mit MCNP bestimmten effektiven Neutronenwirkungsquerschnitte. Darüber hinaus wird MCNP für weitere neutronenphysikalische Berechnungen genutzt, so z.B. um relevante Reaktivitätskoeffizienten zu unterschiedlichen Abbrandzeitpunkten zu bestimmen. Für eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Berechnungen vgl. Anhang A sowie [Pistner und Liebert 2003, Pistner 2006, Pistner et al. 2006].

2.5 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Als Basis für eine Bewertung der mit uranfreien Brennstoffen (IMF) erreichbaren Plutoniumreduktion wurden zunächst klassische Uran-Plutonium-Mischoxidbrennstoffe (MOX) berechnet. Dabei wurde sowohl eine Plutoniumzusammensetzung, wie sie typischem Reaktor-Plutonium (RPu) entspricht, als auch eine Zusammensetzung entsprechend dem in Kernwaffen eingesetzten Plutonium (WPu) analysiert. Im Rahmen der Untersuchungen wurde die zeitliche Änderung der Reaktivität von Brennstoffen mit unterschiedlicher anfänglicher Plutoniumkonzentration bestimmt. Mit Hilfe eines linearen Reaktivitätsmodells wurde auf dieser Grundlage der zu einer jeweiligen Anfangszusammensetzung zugehörige

maximale erreichbare Abbrand¹⁴ errechnet. Damit können Referenzbrennstoffe festgelegt werden, mit denen ein vorgegebener Zielabbrand erreichbar ist. Wir wählen einen Abbrand von 50 MWd/kg(SM) (entsprechend 450 kWd/cm³ bzw. einer Standzeit der Brennelemente im Reaktor von etwa vier Jahren), der etwas höher liegt als heute in Leichtwasserreaktoren typischerweise realisiert. In Tabelle 1 sind Angaben über entsprechende Referenzbrennstoffe zusammengefasst (vgl. ausführlicher Anhang A).

Tabelle 1: Zusammensetzung der wesentlichen Referenzbrennstoffe

Referenzbrennstoff	Pu-Gehalt	Konzentration brennbares Neutronengift (Erbium)
RPu-MOX	0,62 g/cm ³ (4,9%(SM))	-
RPu-IMF-Erbium	0,70 g/cm ³	0,2 g/cm ³
WPu-MOX	0,38 g/cm ³ (4,0%(SM))	-
WPu-IMF-Erbium	0,62 g/cm ³	0,4 g/cm ³

Zusammensetzung der wesentlichen Referenzbrennstoffe, mit denen über vier Zyklen mit einem Gesamtabbrand von 450 kWd/cm³ bzw. 50 MWd/kg(SM) eine Standzeit der Brennelemente im Reaktor von etwa vier Jahren erreicht werden kann. Angegeben ist die anfängliche Plutoniumkonzentration der jeweiligen Brennstoffe, sowie ggf. der Anfangsgehalt des zur Reaktivitätskontrolle eingesetzten brennbaren Neutronengifts Erbium.

Im Weiteren wurden dann IMF mit verschiedenen Anfangszusammensetzungen, vergleichbar den MOX-Brennstoffen, untersucht. Dabei zeigt sich, dass diese Brennstoffe aufgrund der sehr starken Veränderung des Spaltstoffgehalts (es wird kein neues Plutonium erzeugt, wie dies in Uran- oder MOX-Brennstoffen der Fall ist) einen hohen Reaktivitätsverlust im Verlaufe des Abbrands aufweisen. Um die Brennstoffe in typischen Leichtwasserreaktoren einsetzen zu können, muss eine frische Reaktorbeladung jedoch eine anfängliche Überschussreaktivität aufweisen, die für einen Betrieb über einen Beladezyklus mit einer Dauer von ca. 12-18 Monaten ausreicht.¹⁵ Diese muss durch Neutronenabsorber, sogenannte Neutronengifte, kompensiert werden. In Hinblick auf das Kriterium der technischen Machbarkeit sind daher Möglichkeiten zur Reaktivitätskontrolle zu finden (vgl. dazu genauer Anhang A). Auch um die starke Reaktivitätsänderung bei IMF ausgleichen zu können, stellen sogenannte brennbare Neutronengifte (*burnable poisons*, BP), die im frischen Brennstoff enthalten sind und mit der Zeit abgebaut werden, eine attraktive Lösung dar. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurden vier Elemente (Bor, Gadolinium, Europium und Erbium) auf ihre Eignung als BP untersucht. In Hinblick auf das Kriterium der technischen Sicherheit sind dabei aus neutronenphysikalischer Sicht insbesondere die so genannten Reaktivitätskoeffizienten von Bedeutung, die im Normalbetrieb und bei Störungen und Unfällen die Steuerbarkeit und das Verhalten eines Reaktors beeinflussen. Aufgrund verschiedener günstiger Eigenschaften hinsichtlich des Einflusses auf die Werte der Reaktivitätskoeffizienten wurde Erbium als besonders

14 Die Größe des Abbrands eines Brennstoffs ist ein Maß für die Dauer der Bestrahlung im Reaktor. Hierbei wird die über die Zeit im Brennstoff produzierte Energie in Megawatttagen (MWd) bezogen auf ein Kilogramm der ursprünglichen Brennstoffmasse kg(SM) (SM: Schwermetall-Anteil, also nur der Uran- bzw. Plutoniumanteil). Bei einer konstanten mittleren Leistung des Reaktors ist dies direkt proportional zur Bestrahlungszeit. Bei den uranfreien IMF-Brennstoffen kann der Abbrand nicht sinnvoll auf den variablen Schwermetallanteil im Brennstoff bezogen werden, sondern nur auf sein Volumen.

15 Nach jedem Zyklus wird der Anteil der Brennelemente, die bereits vollständig abgebrannt sind, aus dem Reaktor entladen und dafür ein Anteil an frischen Brennelementen eingesetzt. Ein weiterer Teil von teilabgebrannten Brennelementen verbleibt für mindestens einen weiteren Zyklus im Reaktor.

geeignet für den Einsatz in IMF identifiziert.¹⁶ Auch für IMF mit Erbium als BP wurden Referenzbrennstoffe für den oben definierten Zielabbrand identifiziert (vgl. Tabelle 1).

Für diese Referenzbrennstoffe können nun wichtige Eigenschaften in Bezug auf den Abbau des anfänglich enthaltenen Plutoniums berechnet und dann verglichen werden. Bereits aus den Angaben in Tabelle 1 ergibt sich, dass zum Erreichen des gleichen Zielabbrands, d.h. der gleichen Verweildauer im Reaktor, bei IMF eine höhere anfängliche Plutoniumkonzentration erforderlich ist als bei MOX-Brennstoffen.

Tabelle 2: Mit den wesentlichen IMF- und MOX-Referenzbrennstoffen erzielbare Ergebnisse

Brennstoff	Gesamt Pu [g/cm ³]	Pu-239 [g/cm ³]	Wärmerate [W/kg(Pu)]	Neutronenrate [n/(s·g(Pu))]
RPu-MOX	0,43 –30,1%	0,17 –53,5%	17,3 ×1,30	497 ×1,53
RPu-IMF-Erbium	0,21 –70,4%	0,02 –96,1%	28,6 ×2,15	925 ×2,85
WPu-MOX	0,25 –35,1%	0,11 –68,8%	7,5 ×3,02	395 ×6,95
WPu-IMF-Erbium	0,15 –75,6%	0,03 –95,5%	9,73 ×3,93	653 ×11,51

Mit den wesentlichen IMF- und MOX-Referenzbrennstoffen erzielbare Ergebnisse. Angegeben ist die Konzentration des im abgebrannten Brennstoff verbleibenden Gesamtplutoniums sowie des Pu-239-Anteils und die jeweiligen Plutonium-Reduktionsraten (bezogen auf die anfängliche Konzentration). Weiterhin angegeben ist die Wärmerate und die Neutronenrate bezogen auf ein Kilogramm des verbleibenden Plutoniums und der Unterschied in den jeweiligen Raten im Vergleich zum ursprünglich in die Brennstoffe eingesetzten Plutonium (RPu bzw. WPu).

Daraus folgt ein höherer erreichbarer Gesamtumsatz von Plutonium bei vorgegebener Reaktor- und Brennstoffproduktionskapazität, was in Hinblick auf das Kostenkriterium und in zeitlicher Perspektive von Vorteil ist. Bedacht werden muss aber auch, dass in der Regel nur ein Teil der Brennelemente, die in einem Druckwasserreaktor gefahren würden, Plutonium beinhalten werden. D.h., dass bei allen reaktorgestützten Optionen, die heute bereits zur Verfügung stehende Reaktortechnologie nutzen, voraussichtlich weitere uranhaltige Brennstoffe eingesetzt werden müssten, in denen naturnotwendig auch wieder RPu entstehen würde.¹⁷ Wesentliche Kenngrößen zur Bewertung der Nichtverbreitungseigenschaften sind in Tabelle 2 zusammengefasst. So ist mit MOX-Brennstoffen eine Reduzierung des anfänglichen Plutoniums um ca. 30% (RPu-MOX) bis 35% (WPu-MOX) erreichbar. Demgegenüber kann mit den IMF eine Reduzierung von bis zu 70% (RPu-IMF-Erbium) bzw. 76% (WPu-IMF-Erbium) erzielt werden. Es verbleibt also trotz des erheblich höheren anfänglichen Plutoniumgehalts nur etwa halb so viel Plutonium im abgebrannten Brennstoff wie bei vergleichbaren MOX-Brennstoffen. Die Reduzierung des Plutonium-239-Anteils (das hinsichtlich der Verwendbarkeit in Waffen günstigste Isotop) beläuft sich bei MOX-Brennstoffen auf etwas über 50% (RPu) bzw. fast 70% (WPu), bei IMF können demgegenüber sogar Werte von über 95% erreicht werden.

¹⁶ Die günstigen Eigenschaften von Erbium betreffen sowohl den gleichmäßigen Einfluss auf den Reaktivitätsverlauf der Brennstoffe wie die Auswirkungen auf den Brennstoff-Temperaturkoeffizient, den Moderatorichte-Koeffizienten und die Bor-Wirksamkeit. Siehe hierzu ausführlicher [Pistner 2006]. Eine Kurzzusammenfassung findet sich in Anhang A.

¹⁷ Dies gilt sowohl für die MOX- als auch für die IMF-Option. Bei Verwendung von MOX-Brennstoffen muss sogar insgesamt mit einer Netto-Plutoniumproduktion gerechnet werden.

Entsprechend dem deutlich stärkeren Abbau des Plutoniums und der geringeren verbleibenden Plutoniumkonzentration im abgebrannten Brennstoff verändert sich auch die Isotopenzusammensetzung des Plutoniums sehr stark. Im Vergleich zu RPu (vgl. Info 4) ergibt sich beim MOX-Referenzbrennstoff für das verbleibende Plutonium eine um einen Faktor 1,3 erhöhte Wärmerate und eine um einen Faktor 1,53 erhöhte Neutronenrate. Beim Referenzbrennstoff für IMF mit Erbium ist dagegen die Wärmerate um den Faktor 2,15, die Neutronenrate um den Faktor 2,85 erhöht. Für Brennstoffe auf der Basis von WPu verändert sich die Plutoniumzusammensetzung beim MOX-Referenzbrennstoff so, dass das verbleibende Plutonium in seiner Zusammensetzung etwa derjenigen von RPu entspricht. Beim entsprechenden IMF-Brennstoff mit Erbium (WPu-IMF-Erbium) ist die Wärmerate des verbleibenden Plutoniums vergleichbar mit derjenigen von RPu, die Neutronenrate ist jedoch etwa doppelt so hoch wie bei RPu und liegt um einen Faktor 11,5 über derjenigen von WPu (vgl. ausführlicher Anhang A.4). Werden diese Kenngrößen auf die (für eine Kernwaffe notwendige) kritische Masse bezogen, so werden die Vorteile von IMF-Brennstoffen gegenüber MOX-Brennstoffen noch deutlicher: Nach Einsatz von RPu liegt die Gesamtwärme- bzw. Gesamtneutronenrate für eine kritische Masse des dann verbleibenden Plutoniums um etwa einen Faktor 2,5 bzw. 2,7 höher; nach Einsatz von WPu liegt die Wärmerate um einen Faktor 1,6 höher und die Gesamtneutronenrate um einen Faktor 2,2 (vgl. Tabelle 9).

2.6 Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen

Durch die im Rahmen dieses Projekts durchgeführte breite parametrische Untersuchung von IMF konnte die Grundlage geschaffen werden für weitere konkrete technische Optimierungsschritte und für die Entscheidung über forschungspolitische und politische Rahmensetzungen. Die in diesem Projekt aufgezeigte prinzipielle Vorgehensweise zur Optimierung von IMF für die Aufgabe der Plutoniumbeseitigung ist direkt übertragbar auf Situationen, in denen andere Randbedingungen für die konkreten Reaktorparameter oder den Reaktorbetrieb (wie bspw. Vorgabe des Zielabbrandes) vorgegeben werden. Zukünftige weitere Untersuchungen zur Eignung von IMF für eine optimierte Eliminierungsstrategie für vorliegende Plutoniumbestände können direkt darauf aufbauen. Weiterhin wurden Grenzen der möglichen Brennstoffzusammensetzungen aufgezeigt, bei denen noch geeignete Reaktivitätskoeffizienten eingehalten werden (vgl. [Pistner 2006, Pistner et al. 2006]). Damit kann die weitere gezielte Untersuchung der Eignung von IMF zur Eliminierung vorliegender Plutoniumbestände angeleitet werden.

Die Option der Beseitigung von Plutoniumbeständen mit IMF wurde anhand von eigens erarbeiteten Kriterien der präventiven Rüstungskontrolle im Vergleich mit der bisher favorisierten Umsetzung von Plutonium als MOX einer ersten Bewertung unterzogen. In Hinblick auf die technische Machbarkeit haben sich keine Aspekte gezeigt, die die Durchführbarkeit einer IMF-Strategie grundsätzlich in Frage stellen würden. Es verbleiben jedoch noch offene Punkte insbesondere mit Blick auf sicherheitstechnische Aspekte beim Einsatz von IMF in existierenden Leichtwasserreaktoren. Aufgrund der bei IMF im Vergleich mit MOX zu erwartenden besseren Ergebnisse mit Blick auf das politische Ziel der Plutoniumbeseitigung kann auch von einer höheren politisch-gesellschaftlichen Akzeptanz einer IMF-Strategie im Vergleich zu einer MOX-Nutzung ausgegangen werden. Offen bleibt dabei, ob die nichtverbreitungspolitischen Vorteile einer IMF-Strategie ausreichen, um eine politisch notwendige Entscheidung zwischen der Verfolgung von reaktorgestützten Beseitigungsoption gegenüber einer denkbaren Option der Immobilisierung herbeizuführen. Bezüglich Umwelt- und Sicherheitsaspekten ergeben sich für IMF im Vergleich zu MOX keine relevanten Unterschiede, sofern die derzeit noch offenen Fragen zur technischen Realisier-

barkeit (s.o.) mit positivem Ergebnis geklärt werden können. Hinsichtlich des Kriteriums der nuklearen Nichtverbreitung ergeben sich für eine IMF-Strategie im Vergleich zur MOX-Option deutliche Vorteile. So kann aufgrund der höheren Durchsatzrate ein schnellerer Abbau von Beständen, eine möglichst weitgehende Reduktion des Plutoniums und eine deutliche Verschlechterung der Eignung der im abgebrannten Brennstoff verbleibenden Plutoniummengen für Waffenanwendungen erreicht werden. Auch in Hinblick auf Wirtschaftlichkeitsaspekte wirkt sich die höhere Durchsatzrate beim IMF im Vergleich mit MOX positiv aus, da geringere Mengen Brennstoffs zur Beseitigung einer vorliegenden Plutoniummenge hergestellt werden müssten.

Die proliferationspolitischen Vorteile von IMF gegenüber MOX sind durch das Projekt deutlich herausgearbeitet worden. Dies ist insbesondere bedeutsam, da der Trend bei der Frage des Umgangs mit Plutonium aus der nuklearen Abrüstung nach der Entscheidung der Bush Regierung aus dem Jahr 2002, die Immobilisierungsoptionen zunächst nicht weiter zu verfolgen, deutlich in Richtung reaktorgestützter Optionen geht. Umgekehrt erhöht sich angesichts der zeitlichen Verschiebungen und der Kostensteigerungen bei der MOX-Option der Druck, wieder über eine vollständige Immobilisierungsoption nachzudenken. Da bis heute praktisch noch kein Plutonium in den USA oder Russland tatsächlich einer Beseitigungsstrategie zugeführt worden ist, könnte die alternative IMF-Strategie nochmals eine interessante Dynamik bei der Diskussion über den sinnvollsten Pfad des Umgangs mit Plutonium aus der Abrüstung auslösen, was gleichzeitig Folgen für den Umgang mit Plutoniumlagern im zivilen Bereich haben könnte. Die Vorteile von IMF gegenüber MOX – ebenso wie die mit beiden Strategien verbundenen Risiken bei der Nutzung von Plutoniumbrennstoffen in Leichtwasserreaktoren im Vergleich zur gängigen Verwendung von Uranbrennstoff – könnten dabei aber auch zu einer erneuten Diskussion über die Bedeutung von Immobilisierungsstrategien im Verhältnis zum augenblicklich favorisierten MOX-Pfad führen. Wie es ein bekannter Experte von der Harvard University in einem *Hearing* vor dem U.S.-Kongress ausdrückte:

“...before providing the billions of dollars necessary to build and operate major facilities for producing uranium-plutonium mixed-oxide (MOX) fuels in the United States, or to help build new reactors and plutonium fuel facilities in Russia, Congress should ensure that important technological alternatives to current approaches are fully considered”.¹⁸

Die Immobilisierungsoptionen (Verglasung zusammen mit hochradioaktiven Abfällen) müssen auch deshalb wieder mit in die Diskussion über den am ehesten akzeptablen Weg der Plutoniumbeseitigung einbezogen werden, weil man letztlich keine „Wunder“ von reaktorgestützten Optionen hinsichtlich der Eliminierungsrate von Plutonium erwarten kann. Das Potential von heute gängigen Leichtwasserreaktoren kann mit IMF ausgeschöpft werden, wie hier detailliert vorgeführt wurde. Es ist nun zu entscheiden, ob man die Vorteile für groß genug hält, solche Reaktorpfade zu beschreiten oder nicht doch Plutonium zusammen mit bereits existierendem Atom Müll immobilisiert.

Im Anschluss an diese zusammenfassende Bewertung folgen einige Empfehlungen für die Politik, die aus dem Projekt abgeleitet werden:

- Die weltweit vorliegenden Bestände von Plutonium – insbesondere in abgetrennter Form stellen eine beträchtliche und akute Bedrohung für den Weltfrieden dar. Während die militärischen Bestände zurzeit praktisch konstant bleiben, steigen die im zivilen Bereich gelagerten Mengen kontinuierlich jedes Jahr um ca. 10 Tonnen an

¹⁸ M. Bunn, Disposition of Excess Plutonium: Rethinking Security Objectives and Technological Approaches. Testimony before the Subcommittee on Strategic Forces, Committee on Armed Services, U.S. House of Representatives, July 26, 2006.

und werden sehr bald die militärischen Bestände übersteigen. Während die militärische Produktion von Plutonium weitgehend eingestellt ist, ist im zivilen Bereich eher ein noch schnellerer Zuwachs von abgetrennt gelagerten Plutoniumbeständen zu befürchten. Ein weltweites Moratorium der Plutonium-Abtrennung – im zivilen wie im militärischen Bereich – wäre ein entscheidender Schritt, um das Problem des Umgangs mit Plutonium nicht noch weiter anwachsen zu lassen. Der deutsche Verzicht auf die zukünftige Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennstoff ist dabei als ein wichtiger Schritt anzusehen, der Deutschland auch in eine gute Position hinsichtlich der Forderung nach einem internationalen Moratorium bei der Wiederaufarbeitung versetzt. Es sollte ernsthaft darüber nachgedacht werden, dies bei den jetzt anstehenden Überlegungen über den Inhalt eines *Fissile Material Cut-off Treaty* (FMCT) zu berücksichtigen, um die Chance zu eröffnen, dass dieser Vertrag eine Wirkung über den *Status Quo* hinaus entfalten kann.¹⁹

- Für eine Kernwaffe werden nur wenige Kilogramm Plutonium benötigt. Die heute vorliegenden Mengen von jeweils ca. 250 t Plutonium im militärischen wie zivilen Bereich (entsprechend etwa 50.000 potenziellen Kernsprengkörpern) übersteigen bei weitem jeden militärischen Bedarf und werden heute auch im zivilen Bereich weitgehend als zu entsorgender Überschuss und nicht mehr als wertvoller Rohstoff angesehen. Entsprechend müssen technische Lösungen zum Abbau der vorliegenden Plutonium-Bestände gefunden und umgesetzt werden. Hierfür stehen keine einfachen, mit geringem Aufwand umsetzbaren Optionen zur Verfügung, wie dies im Falle von hochangereichertem Uran der Fall ist. Vielmehr sind solche Optionen mit einem beträchtlichen finanziellen, technischen und institutionell-politischen Aufwand verbunden. Da auch die Verwendung von Plutonium als Brennstoff in der zivilen Kernenergienutzung mit erheblichen zusätzlichen Kosten verbunden ist, kann diese Aufgabe nicht einfach der Industrie überlassen werden. Politische Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden, die einen zeitnahen und realistischen Abbau der vorliegenden Bestände wahrscheinlich werden lassen. Deutschland sollte ein dringendes Interesse daran haben, dass die Plutoniumbestände weltweit möglichst rasch und vollständig abgebaut werden. Wünschenswert wären international verbindliche Verträge darüber, die über bilaterale Abkommen, die offenbar nicht viel mehr als Absichtserklärungen sind (so wie zwischen USA und Russland), hinausgehen. Einen Rahmen dafür könnte ein *Fissile Material Cut-off Treaty* (FMCT) abgeben.
- Deutschland als ein angesichts seines technologischen Standes potenziell kernwaffenfähiges Land sollte seinen Plutoniumumgang entsprechend seiner internationalen Verpflichtung vollständig transparent machen, was bislang leider nur unzureichend geschieht. Dazu gehört regierungsamtliche Transparenz über die Beseitigung der gegenwärtig vorliegenden und noch anfallenden Bestände, die in deutschen Reaktoren erzeugt wurden. Ideal wäre die Vorlage einer Plutoniumbilanz, die über die Aktivitäten der Vergangenheit und über die zukünftigen Pläne detailliert und nachvollziehbar Auskunft gibt, so wie es die USA für ihre militärischen Bestände im Ansatz vorgeführt haben. (Der von unabhängiger Seite durchgeführte Versuch einer deutschen Plutoniumbilanz [Kalinowski et al. 2002] hat die Notwendigkeit

19 Vielleicht kann gerade über diese sinnvolle Erweiterung des „Scope“ des Vertrages seine Attraktivität hinsichtlich wirklicher Verhandlungsaufnahme erhöht werden. Wenn der FMCT wenigstens den Rahmen abgeben könnte für weitgehende, verbindliche Erklärung von Staaten oder Staatengruppen, könnte ein Weg vorgezeichnet werden, der Schritt für Schritt mehr Substanz in den Vertrag bringt und gleichzeitig die internationale Vertrauensbildung in die „Haves“ (in Bezug auf Kernwaffen und Zugang zu kernwaffenrelevanten Materialien) steigern kann und so das Interesse der „Have-nots“ an diesem Vertrags-Pfad wieder erhöht.

und die Schwierigkeiten der Aufstellung einer solchen Bilanzierung gut demonstriert). Dies wäre ein wichtiger Beitrag zur internationalen Vertrauensbildung, die von allen Kernwaffenstaaten und kernwaffenfähigen Staaten in Hinblick auf ihre Plutoniumbestände erwartet werden muss. Dies gilt insbesondere für die europäischen Staaten und Japan mit ihren sehr großen separierten Plutoniumbeständen.

- Im Rahmen einer langfristig angelegten Nichtverbreitungspolitik ist ein dauerhafter Verzicht auf eine zivile Nutzung von separiertem Plutonium von wesentlicher Bedeutung. Auch hier sollte Deutschland insbesondere auf die amerikanische Politik einwirken, die dort seit 1978 verfolgte Politik des Verzichts auf die zivile Plutoniumnutzung nicht aufzugeben. Auch sollte sie russischen Bemühungen, im Kontext der Abrüstung eine zivile Plutoniumwirtschaft aufzubauen, weiterhin entschieden entgegen treten. Vielmehr sollte Deutschland im Rahmen der G8-Unterstützung darauf hinzuwirken versuchen, dass alle denkbaren Optionen zum Abbau der vorliegenden Bestände ernsthaft in Betracht gezogen und ggf. auch technische und finanzielle Unterstützung für die Verwirklichung von Strategien alternativ zur MOX-Option gegeben werden. Weitere Verzögerungen und Kostensteigerungen in den bisherigen Planungen zeigen die Notwendigkeit einer Neuorientierung gerade auch bei der Diskussion um den Abbau der militärischen Bestände.
- Es ist dabei zunächst klarzustellen, dass eine vollständige Vernichtung von Plutonium mit den heute realistisch denkbaren technischen Optionen nicht möglich ist. Auch bei einem Einsatz von Plutonium in Reaktoren wird lediglich die Menge des Plutoniums reduziert und ein erneuter Zugriff auf die verbleibenden Bestände erschwert. Auch bei langfristig denkbaren neuen Reaktorkonzepten ist – ohne eine mehrfache Wiederaufarbeitung von abgebranntem Brennstoff, die mit erheblichen Proliferationsrisiken verbunden wäre – keine grundsätzlich andere Situation zu erwarten. Allerdings konnte im Rahmen dieses Projekts gezeigt werden, dass mit der heute verfolgten Variante der Umsetzung von Plutonium als MOX keine idealen Ergebnisse aus Sicht der nuklearen Nichtverbreitung erzielt werden. In den heute verfügbaren Reaktoren könnte eine deutlich stärkere Reduzierung des eingesetzten Plutoniums durch die Verwendung von so genannten uranfreien Brennstoffen (*Inert Matrix Fuel*, IMF) erreicht werden. Bei diesen Brennstoffen wird das Uran, welches im MOX-Brennstoff den größten Anteil ausmacht, durch ein anderes Material ersetzt, das möglichst nicht mit Neutronen wechselwirkt. Dadurch wird eine weitere Produktion von Plutonium vermieden. Anstelle einer Reduktion um 30-35% bei MOX wird damit ein Abbau von 70-75% des anfänglichen Plutoniums in IMF erreichbar. Weiterhin wird die Verwendbarkeit des verbleibenden Plutoniums für Waffenanwendungen durch eine sehr starke Änderung seiner Isotopenzusammensetzung deutlich verschlechtert, auch wäre die Konzentration im abgebrannten Brennstoff wesentlich geringer als bei MOX. Schließlich wäre der erreichbare Durchsatz bei festen Reaktorkapazitäten aufgrund des höheren anfänglichen Plutoniumgehalts in IMF größer als bei einer MOX-Strategie. Die IMF-Option sollte daher zumindest auf der Ebene der Forschung und Entwicklung weiterverfolgt werden.
- Allerdings verbleiben noch offene Fragen hinsichtlich der technischen Machbarkeit eines solchen IMF Einsatzes in heutigen Reaktoren. Diese betreffen insbesondere Fragen der Reaktorsicherheit und der geeigneten Brennstoffwahl. Diese Fragen müssen im Rahmen der weiteren Forschung und Entwicklung von IMF geklärt werden, bevor eine endgültige Entscheidung hinsichtlich des weiteren Vorgehens getroffen werden kann. Zurzeit ist jedoch nicht erkennbar, dass eine IMF-basierte Stra-

ategie zur Beseitigung existierender Plutoniumbestände nicht technisch möglich wäre. Die Bedeutung einer solchen Strategie im Vergleich zur MOX-Option, aber auch zu anderen als realistisch diskutierten Beseitigungsoptionen wie der Immobilisierung, kann nur im Rahmen einer breiten und öffentlich geführten Debatte auch auf der Basis der in diesem Projekt spezifizierten Kriterien der Präventiven Rüstungskontrolle geklärt werden.

3. Wege zur Erhöhung der Proliferationsresistenz von Spallationsneutronenquellen

3.1 Einleitung

Technologien, mit denen kernwaffenrelevantes Material hergestellt werden kann, sind prinzipiell als ebenso problematisch einzustufen wie die bestehenden Bestände an spaltbaren Materialien. Im Rahmen des Konzeptes präventiver Rüstungskontrolle sollen solche Technologien möglichst rechtzeitig untersucht und Vorschläge für adäquate Umgangsweisen entwickelt werden [Englert 2005a]. Schon die Bekanntgabe der Entwicklung oder des Besitzes einer solchen Technologie seitens einer Nation kann sich gravierend auf die Sicherheitspolitik und die Stabilität auswirken wie Beispielfälle aus der jüngeren Vergangenheit zeigen (Plutoniumproduktion und -abtrennung in Nord-Korea, Anreicherungstechnologien im Iran und Irak). Weiterhin ist bei solchen Technologien die Gefahr der horizontalen Proliferation (Weiterverbreitung) und der vertikalen Proliferation (Erweiterung und Weiterentwicklung von existierenden Kernwaffenarsenalen), gerade auch aufgrund des ausgeprägten *Dual-Use*-Charakters nuklearer Technologien, augenfällig. Dies zeigen auch historische Beispiele, wie z.B. der Verkauf eines 40 MW Schwerwasserreaktors von Kanada an Indien im Jahr 1955, mit dessen Hilfe das Plutonium für die „friedliche“ indische Nuklearexplosion im Jahr 1974 erzeugt wurde, oder Forschungs- und Entwicklungsprogramme in den USA, die mit Hilfe von Spallationsquellen die Produktionsmöglichkeiten für kernwaffenrelevante Materialien verbessern sollten.²⁰

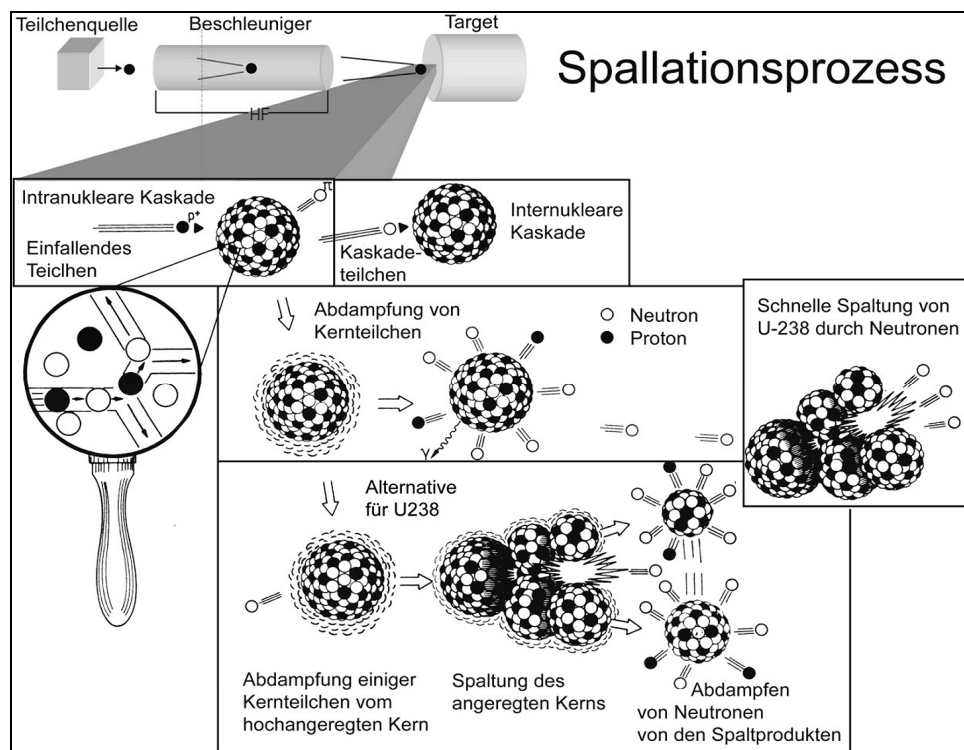
Bereits existierende oder noch in Entwicklung befindliche – und damit neuartige – sensitive Produktionstechnologien sollten daher frühzeitig einer Analyse unterzogen werden, so dass Wege der internationalen Kontrolle oder der angemessenen, proliferationsresistenten Technologiegestaltung erschlossen werden können. Die Untersuchungen des hier vorliegenden Projekts beziehen sich auf das Technologiebeispiel der Spallationsneutronenquellen (SNQs) [Englert 2004, Englert 2005b, Englert et al. 2006]. Es wird zunächst untersucht, ob mit SNQs signifikante Mengen kernwaffenrelevanten Materials erzeugt werden können. Nach dieser quantitativen Klärung des proliferationsrelevanten Potentials von SNQs wird in Abhängigkeit von zentralen Anlagenparametern untersucht, wie mit relevanten Proliferationspotentialen umgegangen werden kann. Insbesondere wird der Frage nachgegangen, ob und wie eine möglichst frühzeitige Gestaltungsmöglichkeit ausfindig gemacht werden kann, die eine weitestgehend proliferationsresistente Auslegung dieser Technologie ermöglicht. Damit verbunden ist idealerweise das Ziel – falls erforderlich – alternative proliferationsresistentere Anlagenkonzepte aufzuzeigen. Solche alternativen Gestaltungskonzepte wären dabei so ausgelegt, dass eine ausschließlich zivile Nutzung erfolgen kann, also kein Zugriff auf kernwaffenrelevante Materialien in signifikanten Mengen möglich ist. Weniger ideale Konzepte könnten die benötigte Zeit zur Abzweigung bzw. Herstellung von Waffenstoffen erheblich verlängern und den Aufwand für die jeweiligen Akteure vergrößern. Eine auf Prävention ausgerichtete Analyse der Spallationstechnologie soll es auch erlauben, sensitive Anlagenteile und -parameter, Materialien-Einsatz sowie proliferationsrelevante Nutzungskonzepte zu identifizieren, die in Rüstungskontrollüberlegungen einfließen sollten. Dazu gehören Hinweise zur Möglichkeit von *Safeguards* oder auch von Exportkontrollen.

²⁰ Zu nennen sind hier die Programme MTA (Material Testing Accelerator, 1950-1954) und FERFICON (*Fertile-to-Fissile Conversion*, 1975-1988) zur Produktion von spaltbaren Materialien und in neuerer Zeit das ATP – *Accelerator Production of Tritium* Programm zur Erzeugung von Tritium.

3.2 Spallationsneutronenquellen (SNQs) und ihr Proliferationspotential

Spallationsneutronenquellen (SNQs) dienen ähnlich wie Forschungsreaktoren zur Produktion von Neutronen, die in der Forschung genutzt werden. Um die Neutronen zu erzeugen, werden in SNQs Protonen mit Hilfe von Beschleunigern auf Energien von einigen hundert Megaelektronenvolt (MeV) bis zu einigen Gigaelektronenvolt (GeV), d.h. nahezu auf Lichtgeschwindigkeit,²¹ beschleunigt und prallen anschließend auf ein Ziel (Target) aus Schwermetall (siehe Abbildung 2). Die dann erfolgende Reaktion der schnellen energiereichen Protonen mit den Atomkernen des Targetmaterials kann als elastische Partikel-Partikel Kollision beschrieben werden (sog. intranukleare Kaskade). Eintreffende Protonen können einige Kernbestandteile – vor allem Protonen und Neutronen – aus dem Atomkern heraus schlagen bzw. absplittern lassen (engl. „to spall“). Der resultierende Atomkern ist energetisch hochangeregt und dampft zusätzliche Neutronen ab, um einen niedriger angeregten Zustand zu erreichen; der heiße Kern kühlt dadurch ab.

Abbildung 2: Spallationsprozess



Spallationsprozess (Bild angelehnt an [Bauer 1981]). Ein Proton wird in einer Quelle erzeugt und in einem Beschleuniger auf hohe Geschwindigkeit (Energie) beschleunigt. Es prallt mit annähernder Lichtgeschwindigkeit auf die Atomkerne eines Schwermetalltargets. Es folgt die intranukleare Kaskade: In einem Atomkern prallt das einfallende Proton auf Protonen und Neutronen des Targetkerns und kann diese und weitere Teilchen aus dem Kern des Targetatoms heraus schlagen bzw. absplittern (engl. „to spall“). Ein herausgeschlagenes Teilchen kann auch noch genug Energie für weitere Spallationsreaktionen mit weiteren Targetatomen haben (internukleare Kaskade). Vom hochangeregten Restkern werden vor allem Neutronen abgedampft. In spaltbaren Materialien wie U-238 kann der angeregte Kern gespalten werden und entstandene Neutronen können weitere Spaltungen induzieren und so die Neutronenpopulation nochmals erhöhen. Damit ist aus einem einfallenden Proton in der Regel eine größere Anzahl an Neutronen entstanden.

²¹ 1 GeV entspricht 1000 MeV. Die Maßeinheit MeV (Megaelektronenvolt) ist ein typisches Energiemaß für den atomaren und subatomaren Bereich. Bei 150 MeV erreichen die beschleunigten Protonen bereits etwa die halbe Lichtgeschwindigkeit von ca. 300.000 km/sec. Bei 1,5 GeV = 1.500 MeV werden etwa 92% der Lichtgeschwindigkeit erreicht.

Das ursprüngliche einfallende Proton oder ein anderes durch dieses herausgeschlagene Teilchen kann noch genug Energie besitzen, um eine weitere oder sogar mehrere Spallationsreaktionen in weiteren Kernen auszulösen (sog. internukleare Kaskade). Wenn das Targetmaterial aus einem spaltbaren Material (wie z.B. Uran) besteht, können die entstandenen Neutronen darüber hinaus noch Kernspaltungen verursachen, welche die Anzahl der produzierten Neutronen nochmals erhöhen.²²

Die Neutronenausbeute, d.h. die Anzahl der erzeugten Neutronen pro Proton, ist ein wichtiger Parameter einer SNQ und hängt von der Energie des einfallenden Teilchens, vom Material und der Geometrie des Targets und weiteren Parametern ab. Typisch ist ein Wert von 1-70 Neutronen pro einfallendem Proton.²³ Der Fluss der Neutronenquelle – also die Menge an Neutronen, die pro Zeit und Flächeneinheit die Oberfläche des Targets verlassen und für Experimente genutzt werden können, hängt wiederum direkt von der Neutronenausbeute und vom Strom des Beschleunigers (also der Anzahl der Protonen im Protonenstrahl pro Zeiteinheit) ab. Je schneller, d.h. energiereicher das einfallende Proton, desto mehr Neutronen werden freigesetzt. Ebenso gilt: je höher der Beschleunigerstrom ist, d.h. je mehr Protonen auf das Target aufprallen, desto mehr Neutronen werden erzeugt. Der Neutronenfluss ist ein wesentliches Merkmal der Güte einer SNQ. Der Zusammenhang zwischen der Energie der Protonen (Geschwindigkeit) und der Neutronenausbeute aus dem Spallationsprozess ist ab Energien von 300-400 MeV bis etwa 1,5 GeV nahezu linear, d.h. die Protonenenergie ist dann proportional zur Anzahl der entstehenden Neutronen. Zur Beschleunigung der Protonen werden üblicherweise Linearbeschleuniger (LINAC – Linear Accelerator), oder Kreisbeschleuniger (Cyclotrons oder Synchrotrons) verwendet. Typische Beschleunigerparameter, die bereits für heute existierende Spallationsquellen erreichbar wurden, sind Ströme im Bereich zwischen 0,1 und 1,8 Milliampere (mA) und Protonenenergien zwischen 0,5 und 1 GeV (vgl. Übersichten im Anhang C).

Die äußere Dimension einer solchen Anlage hängt vom verwendeten Beschleunigertyp und der zu erreichenden Endenergie der Protonen ab.

Ein Linearbeschleuniger hat typischerweise eine Länge von hundert bis zu einigen hundert Metern. Cyclotrons sind wesentlich kompakter und haben einen Durchmesser von einigen bis zu über zehn Metern. (Das Cyclotron am Paul Scherrer Institut (PSI) in der Schweiz mit einer Energie von 590 MeV und einem Strom von 1,8 mA hat beispielsweise einen Durchmesser von ca. 9 m.).

Wie mit jeder neutronenerzeugenden Technologie, lassen sich prinzipiell auch mit Spallationsneutronenquellen kernwaffenrelevante Materialien (Plutonium, Uran-233 bzw. Tritium) durch Neutronenbeschuss (von Uran, Thorium bzw. Lithium oder Helium-3) erzeugen. Etwa 4-5 Kilogramm Plutonium (oder Uran-233) sind ausreichend, um eine kleine Nuklearwaffe herzustellen und wenige Gramm Tritium genügen, um deren Effizienz stark zu verbessern (siehe Info 1). Um das Proliferationspotential von SNQs zu beurteilen, ist es wesentlich, die möglichen Produktionsraten zu bestimmen. Produktionsmengen pro Jahr geben relevante Informationen für die mit den Anlagen verbundenen Proliferationsgefahren. Ein scharfes Kriterium, das angibt, ab wann eine Anlage als proliferationsrelevant einzustufen ist oder nicht, lässt sich nicht völlig eindeutig festlegen. Zum Zwecke einer präventiven Technologieanalyse kann aber für die hier vorgelegte Untersuchung eine Produktionsrate von 500 g pro Jahr als signifikant angenommen werden

22 Wieviele Neutronen bei einer Spallationsreaktion freigesetzt werden ist, materialspezifisch. Je mehr Neutronen ein Atomkern des Targetmaterials enthält, desto mehr Neutronen können in dem Material entstehen. Deswegen werden vornehmlich Schwermetalle (Blei, Quecksilber, Tantal, Wolfram oder auch Uran) im Target eingesetzt.

23 40 Neutronen pro Proton entstehen im Falle eines Zylinders aus natürlichem Uran mit einem Radius von 5 cm und einer Länge von 60 cm, der mit Protonen einer Energie von 1 GeV beschossen wird.

(Signifikanzschwelle).²⁴ Eine solche Produktionsrate würde es erlauben, in 8-10 Jahren genug Plutonium (bzw. Uran-233) für eine Kernwaffe (4-5 kg) zu produzieren.

Bisher wurde Plutonium fast ausschließlich in Reaktoren produziert, deren Proliferationsrisiken in Zusammenhang mit der Wiederaufarbeitung bekannt und im Prinzip sehr gut untersucht sind (vgl. z.B. aus jüngerer Zeit [Gilinsky 2004]). Länder wie die USA haben aus diesem Grund seit Ende der 1970er Jahre auf Abtrennung und Nutzung von Plutonium im zivilen Bereich verzichtet. Ein größerer Teil der Mengen an Plutonium, die weltweit in Nicht-Kernwaffenstaaten vorhanden sind, unterliegen *Safeguards* der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) sowie Exportkontrollmaßnahmen nuklearer Lieferländer.

Bereits seit den 1950er Jahren wurde in zahlreichen Projekten, angefangen von Papierstudien bis hin zu Demonstrationsanlagen, die Produktion kernwaffenrelevanter Materialien mit Beschleunigern unter Nutzung der Spallationsreaktion untersucht. Bisher wurden allerdings nur in wenigen Ländern große Spallationsanlagen gebaut, die auch ausschließlich für Forschungszwecke konzipiert sind und nicht zur Materialproduktion.²⁵ Dass in der Vergangenheit ausschließlich Reaktoren zur Produktion von Plutonium genutzt wurden, liegt einerseits daran, dass genügend effiziente Hochstrombeschleuniger noch nicht zur Verfügung standen, andererseits erschien die Produktion mittels SNQ als vergleichsweise kostenintensiv. Die Proliferationsgefahren von SNQs wurden daher bislang als gering eingeschätzt.²⁶ Allerdings blieb dabei weitgehend unbeachtet, dass (wie in Abschnitt 3.1. bereits kurz angemerkt wurde) Kernwaffenstaaten wie die USA oder Frankreich Programme zur Nutzung von Spallationsquellen in ihren Kernwaffenprogrammen durchgeführt haben, was eine gewisse Attraktivität der SNQ-Technologie für Kernwaffenzwecke belegt.

Ungünstig für die Rüstungskontrolle wirkt sich aus, dass für SNQs bis heute keine expliziten, anlagenbezogenen *Safeguards* oder andere Kontrollmechanismen entwickelt bzw. angewendet wurden. Dies liegt auch daran, dass die meisten größeren Anlagen bislang in Kernwaffenstaaten errichtet wurden, die sich keinen *IAEO-Safeguards* unterwerfen müssen.

Dieses Bild der Proliferationsrisiken von SNQs könnte sich aus den folgenden vier sich wechselseitig beeinflussenden Gründen wandeln:

1. Die technologische Dynamik der Beschleunigerentwicklung hat in den letzten 20 Jahren zu einer Steigerung der verwendeten Beschleunigerströme geführt. Standen in den 1970-1980er Jahren Anlagen mit Strömen von einigen 0,1 mA (100 μ A) an der Spitze der Entwicklung, sind heute Anlagen mit bis zu 1,8 mA in Betrieb und im niederenergetischen Bereich bereits kommerziell erhältlich (vgl. Übersichten in Anhang C).²⁷ Der Betrieb von Prototypen für Vorbeschleuniger (LINAC-RFQ) mit weit

24 Die Angabe von 500 g Pu pro Jahr als Signifikanzschwelle ist eher hoch. Sollte tatsächlich über entsprechende Überwachungsmaßnahmen nachgedacht werden, sollte die Signifikanzschwelle niedriger angesetzt werden. Die Definition von 500 g/a Pu lehnt sich an die Einstufung der „*Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*“ INFCIRC/274 der IAEO an. In ihr werden bestimmte Mengen Plutonium in Kategorien eingeteilt, die Unterschiede in der Sicherung der Anlage oder für einen Transport erfordern, in denen das Material gelagert ist. Kategorie III entspricht einer Menge von 15-500g Pu, Kategorie II 500g-2kg Pu, Kategorie I mehr als 2 kg Pu. [IAEO-INFCIRC 274]. Die Menge von 500 g Pu pro Jahr entspricht dem Übergang von Kategorie I zu II und wird auf eine Produktionszeit von einem Jahr bezogen. Eine andere Einschätzung der Proliferationsrelevanz gab es in den ursprünglichen anlagen-spezifischen *Safeguards* nach INFCIRC/66 (siehe Anhang B). Hier wurden Anlagen unter *Safeguards* gestellt die mehr als 100 g Pu pro Jahr erzeugten. Noch „konservativer“ sind Mengenangaben in den „*Guidelines for the Management of Plutonium*“ (IAEO-INFCIRC 549) bzw. den „*Guidelines for the Export of Nuclear Material, Equipment and Technology*“ (IAEO-INFCIRC 254/rev.8 Part1) der *Nuclear Suppliers Group*, an denen sich allerdings nicht alle Staaten beteiligen. Hier ist ein internationaler Transfer einer Menge von 50 g Pu innerhalb eines Jahres meldepflichtig und das Material fällt unter *Safeguards* der IAEO.

25 Siehe Anhang C für eine Übersicht der wichtigsten Anlagen und Projekte.

26 Vgl. aber bereits [Magill und Peerani 1999, Riendeau 1999].

27 Siehe etwa das CYCLOTRON 30 der Firma IBA mit einer Energie von 30 MeV und einem Strom von 1,5 mA. <<http://www.iba-worldwide.com>>.

höheren Strömen von bis zu 100 mA wurde bereits erfolgreich demonstriert.²⁸ Daher ist eine weitere Steigerung des Stromes von größeren Beschleunigeranlagen auf mindestens 10 mA in der näheren Zukunft zu erwarten. Bei der Abschätzung des Proliferationsrisikos von SNQs kann daher als konservative Annahme ein Strom von mehr als 0,1 mA (100 μ A), als moderate Annahme ein Strom von 1 mA und als progressive Annahme ein Strom von 10 mA zugrunde gelegt werden. Zukünftig könnten auch Anlagen mit bis zu 100 mA möglich werden.

2. Beschleuniger werden nicht nur für Spallationsneutronenquellen eingesetzt, sondern ebenso in anderen Bereichen der Forschung, Industrie und Medizin. Eine weitere Zunahme der Nutzung und damit der Weiterverbreitung dieser Technologie ist zu erwarten. Dies wirkt sich wiederum auf ihre Weiterentwicklung und die Technologiedynamik aus. In Zukunft werden Beschleuniger immer kompakter, energieeffizienter und leistungstärker sowie vor allem auch kostengünstiger erhältlich sein.
3. Aufgrund der Dynamik in der Beschleunigerentwicklung werden SNQs die Rolle von Reaktoren zur Neutronenerzeugung für die Forschung ergänzen bzw. ersetzen, was wiederum positiv auf die Dynamik der Beschleunigerentwicklung rückwirkt. Die erreichbaren Spitzenflüsse an Neutronen sind heute schon bei SNQs höher als die Neutronenflüsse von Forschungsreaktoren. Beim bisher erreichten mittleren Fluss sind die Reaktoren Spallationsquellen allerdings noch überlegen. Spallationsquellen besitzen hier jedoch im Gegensatz zu Reaktoren noch ein erhebliches Entwicklungspotential (vgl. Angaben zu existierenden und geplanten Spallationsanlagen im Anhang C).
4. Seit den 1990er Jahren erleben Pläne zur Energieerzeugung mit beschleunigergetriebenen Reaktorsystemen neuen Auftrieb. Dies sind etwa Systeme, die im Gegensatz zu heutigen Reaktoren mit einer äußeren Neutronenquelle betrieben werden und daher subkritisch bleiben sollen. Solche Anlagen könnten auch zur sog. Transmutation von radioaktiven Abfällen dienen, wobei eine Umwandlung von Teilen der langlebigen in kurzlebige oder stabile Isotope angestrebt wird. Bisher handelt sich aber um Forschungs- und Entwicklungsprojekte, von denen noch nicht klar ist, ob sie je zu einer kommerziell betriebenen Anlage führen werden [Liebert et al. 1999]. Sollte in diesem Bereich ein staatliches Programm zum Bau einer solchen Anlage aufgelegt werden, wird dies mit Sicherheit einen starken Einfluss auf die Fortentwicklung, Kommerzialisierung und Weiterverbreitung der Spallationstechnologie haben.

Weiterhin ist damit zu rechnen, dass nunmehr in zunehmendem Maße SNQs in Nicht-Kernwaffenstaaten errichtet werden, wie Projekte beispielsweise in Japan oder Europa zeigen (vgl. Anhang C).

28 Das Vorbeschleunigen auf einige MeV und Konzentrieren der Partikel auf einen gleichmäßigen Strahl ist eine der wesentlichen Hürden bei der Entwicklung von Hochstrombeschleunigern.

3.3 Berechnung von Plutoniumproduktionsraten in Spallationsneutronenquellen und erste Potentialabschätzung

Schon mit ersten etwas größeren Abschätzungen lässt sich zeigen, dass eine Produktion von Plutonium²⁹ im Kilogramm-Bereich mit einer heute vorhandenen Spallationsneutronenquelle prinzipiell möglich ist.³⁰ Über die wesentlichen Parameter einer SNQ, Protonenenergie und Beschleunigerstrom, wurde schon gesprochen. Diese zwei Parameter sind ebenfalls die wesentlichen Größen, die für eine Abschätzung der Produktionsrate und damit der Proliferationsrelevanz einer SNQ genutzt werden können.

Zur Bestimmung der Plutoniumproduktion in Abhängigkeit von Strom und Energie sowie der Größe und Geometrie des Targets führen wir Computersimulationen der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse durch. Aufgrund der rasanten Computerentwicklung stehen heutzutage Programme bereit, die es erlauben, ein dreidimensionales Modell eines Spallationstargets zu erstellen und die komplexen Reaktionen beim Spallationsprozess, den Transport von Protonen und Neutronen im Targetmaterial und die Erzeugung von weiteren Elementen, wie Plutonium, vollständig zu simulieren. Hierfür werden sog. Monte-Carlo Verfahren verwendet, bei denen die Ereignisgeschichten einzelner in der Simulation gestarteter Teilchen verfolgt werden, die die Geometrie durchqueren und verschiedenste Prozesse an verschiedenen Orten auslösen. Welcher Prozess stattfindet und welche Richtung ein Teilchen etwa nach einer Kollision einschlägt, wird durch gewichtete Zufallszahlen ermittelt. Aus einer größeren Anzahl solcher Ereignisgeschichten werden dann statistisch gemittelte Ergebnisse errechnet. Die Berechnungen erfolgten hier durch das Programmpaket MCNPX³¹ (*Monte Carlo N-Particle eXtended Transport Code*). Generell gelten Monte-Carlo Berechnungen des Neutronentransports als sehr zuverlässig. Zur Bestimmung der Güte der Ergebnisse der Spallationssimulation wurden Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Experimenten durchgeführt, die eine befriedigende Übereinstimmung aufweisen (vgl. [Englert 2004]).

Um eine erste Einordnung des möglichen Potentials zur Plutoniumproduktion zu erhalten, wurde zunächst das theoretische Maximum der Produktion von Plutonium durch direkten Beschuss eines Urantargets in einer Spallationsanlage berechnet. Dieser Fall kann in der Computersimulation durch eine isotrope Protonenpunktquelle in einer Urankugel modelliert werden (siehe auch Anhang B.2).³² Durch die Simulation einer quasi unendlich³³ ausgedehnten Urankugel ergibt sich die maximal erreichbare Produktionsrate bei direktem Protonenbeschuss³⁴ eines Urantargets, da dann keine Neutronenverluste durch die Oberflächen mehr betrachtet werden. Dies bedeutet, dass jedes entstandene Neutron letztlich von einem Urankern eingefangen wird und dadurch ein Plutoniumkern entsteht. Mit einigen vereinfachenden Annahmen lassen sich die in der Tabelle 3 knapp zusammengefassten Produktionsraten berechnen.³⁵ Hier wird der erreichbare Beschleunigerstrom als Maß für die technische Entwicklung sowie die Protonenenergie als Maß für die Größe der Anlage benutzt.

29 Im Folgenden werden nur die Ergebnisse für Plutonium detailliert vorgestellt. Entsprechende Angaben für die Produktion von U-233 und Tritium finden sich in Anhang B.6 und B.7.

30 Vgl. dazu bereits [Magill und Peerani 1999].

31 [Waters 2002, Pelowitz 2005].

32 Simulationen zu einer möglichen Produktion von U-233 aus Thorium bzw. Tritium aus Helium-3 werden in Anhang B.6 und B.7 vorgestellt.

33 Quasi unendlich bedeutet, dass die Abmessungen der modellierten Kugel viel größer sind als die Entfernung, bis zu der sämtliche entstandenen Neutronen im Targetmaterial absorbiert wurden.

34 Trennt man das Target, in dem die Neutronen erzeugt werden, und das Blanket, in dem Plutonium aus Uran produziert wird, könnte das Brutpotential durch geeignete Maßnahmen nochmals gesteigert und optimiert werden (siehe unten im Abschnitt 3.5).

35 Zu den zugrundeliegenden vereinfachenden Annahmen siehe Anhang B.1.

Die maximalen Produktionsraten sind für ein Jahr verfügbare Strahlzeit berechnet. In tatsächlichen Anlagen liefert der Beschleuniger aufgrund von Wartung, unerwarteten Ausfällen und je nach Nutzung keinen kontinuierlichen Protonenstrahl. In Forschungsanlagen, in denen häufig Umbauten vorgenommen werden, sinkt die Verfügbarkeit der Anlage bis zu unter 50 % im Jahr, bei einer Nutzung als Produktionsanlage kann die Verfügbarkeit jedoch bis über 90 % gesteigert werden (siehe Anhang B.1).

Wie in einem Reaktor (siehe Info 2) entstehen unter Neutronenbestrahlung aus dem Uranisotop U-238 nicht nur Pu-239 sondern auch höhere Plutoniumisotope (Pu-240, Pu-241, Pu-242). Unter den besonderen Bestrahlungsbedingungen in einer Spallationsneutronenquelle (sehr hochenergetische, „schnelle“ Neutronen) ist der Prozentanteil höherer Plutoniumisotope jedoch so gering (<1%), dass das entstandene Plutonium fast ausschließlich aus dem besonders waffentauglichem Isotop Pu-239 besteht (vgl. Anhang B.1). Das in einer Spallationsquelle erbrütete Plutonium ist daher in besonderem Maße proliferationsrelevant. Im Folgenden geben wir daher Pu-239 bei den Produktionsmengen an, da dies der gesamten Produktionsmenge von Plutonium nahezu entspricht (vgl. dazu auch Info 2 und 4).

Tabelle 3: Maximale Pu-239 Produktion in Kilogramm pro Jahr verfügbare Strahlzeit

Größe der Anlage	technologische Dynamik der Beschleunigerentwicklung			
	konservativ (0,1 mA)	aktuell/moderat (1 mA)	progressiv (10 mA)	zukünftig (100 mA)
klein (150 MeV)	0,021 kg	0,21 kg	2,1 kg	21 kg
mittel (500 MeV)	0,22 kg	2,2 kg	22 kg	220 kg
groß (1 GeV)	0,65 kg	6,5 kg	65 kg	650 kg

Jährliche maximale Plutoniumproduktion (siehe ausführlicher Anhang B.2) bei direktem Beschuss von Uran ohne weitergehende Optimierung (z.B. durch Moderation der Neutronen) in Abhängigkeit des Beschleunigerstroms (in mA) – als Maß für die technologische Entwicklungsdynamik – und der Protonenenergie (in MeV/GeV) als Maß für die Größe der Spallationsneutronenquelle.

Die energieabhängige Berechnung der Plutoniumproduktionsrate skaliert linear mit dem Beschleunigerstrom, wie in Tabelle 3 für verschiedene Annahmen bezüglich des erreichbaren Beschleunigerstromes dargestellt. Je höher der Strom ist, desto mehr Protonen bombardieren das Target pro Zeiteinheit und desto mehr Neutronen entstehen pro Zeiteinheit, die mit den Urankernen reagieren und Plutonium bilden können.³⁶

Die Simulation ergibt weiterhin, dass bei einem Protonenstrom von 1 mA (moderat) wie er in existierenden Anlagen schon eingesetzt wird und einer typischen Protonenenergie von 0,5 bis 1 GeV eine maximale Plutoniumproduktion von 2,2 bis 6,5 kg pro Jahr verfügbare Strahlzeit erreichbar ist. Nimmt man eine progressive Entwicklung des Stromes von Beschleunigern an (10 mA), so sind in diesem idealisierten Maximalszenario einige Dutzend Kilogramm Pu-239 pro Jahr verfügbare Strahlzeit produzierbar, genug Material für ca. 5-10 Kernwaffen. Bei einer konservativen Annahme für den Strom von einigen 100 μ A (0,1 mA) sind nur sehr große Anlagen mit einer hohen Energie der Protonen relevant. Hochstromanlagen der Zukunft (größer 10 mA) haben in allen Energiebereichen (Anlagengröße) relevante Plutoniumproduktionsraten.

³⁶ Der Zusammenhang der Produktionsrate mit der Protonenenergie ist ebenfalls ab Energien von etwa 300-400 MeV bis ca. 1,5 GeV annähernd linear.

3.4 Mögliche realistische Szenarien für Produktion von Waffenstoffen

Um konkretere und realistische Produktionsszenarien zu untersuchen, ist es nicht ausreichend, die Maximalproduktion in einer (infiniten) Kugel abzuschätzen. Es ist notwendig, sich eingehender mit weiteren relevanten Parametern einer Spallationsneutronenquelle zu beschäftigen. Dazu gehören neben dem Strom des Beschleunigers und der Energie der einfallenden Teilchens vor allem die Targetdimensionen und damit die Menge an Targetmaterial, das bestrahlt wird.³⁷

In einer quasi infiniten Kugel wie zunächst angenommen verlässt kein entstandenes Neutron die Geometrie, so dass letztlich jedes produzierte Neutron ein Plutoniumatom erzeugen kann. In der Realität ist das Target jedoch nicht kugelförmig und von endlicher Ausdehnung. Dann können Neutronen die Oberfläche verlassen, was im Falle einer Anlage zur Erzeugung von Neutronen für die Forschung sogar erwünscht ist, um die Neutronen zu Experimenten leiten zu können.

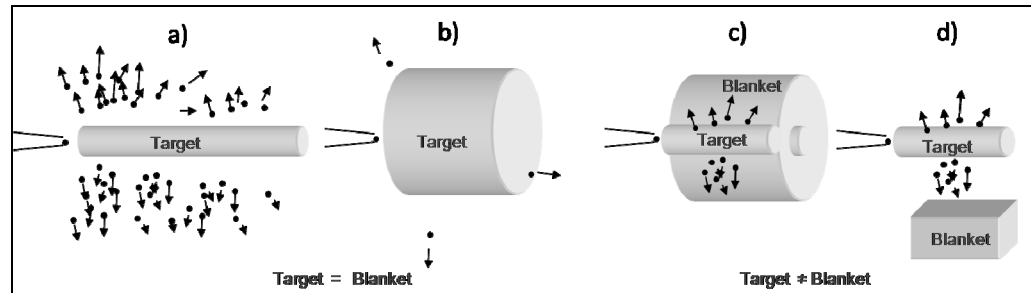
Typische Festkörpertargets für Spallationsanlagen besitzen meist annähernd Zylinderform. Auf die Grundfläche des Zylinders prallen die Protonen auf und dringen tief in das Targetmaterial ein, bevor die Spallationsreaktionen stattfinden. Hierbei wird eine große Menge Energie (typischerweise etwa 10 kW bis 5 MW) in einem sehr kleinen Volumen des Targetmaterials deponiert. In diesem Bereich erhitzt sich das Target sehr stark und das Metall würde ohne Kühlung schmelzen. Ein typisches Target muss aufwändig gekühlt werden, und besteht daher nicht aus einem soliden Block, sondern ist mit Kühlflüssigkeit durchströmt.

Abb. 3a zeigt schematisch die Nutzung eines Targets in einer Forschungsneutronenquelle. Hier sollen gerade möglichst viele Neutronen das Target verlassen, um für Experimente zur Verfügung zu stehen. Abb. 3b hingegen zeigt eine Nutzung zur Materialproduktion, bei der möglichst viele entstandene Neutronen zur Materialproduktion beitragen sollen und daher kaum Neutronen die Oberfläche verlassen.

Zu unserer Untersuchung der verschiedenen Geometrien und ihrer Einflüsse auf die Plutoniumproduktionsrate diente die Simulation des Protonenbeschusses einfacher Zylindergeometrien aus natürlichem Uran mit Hilfe des Computercodes MCNPX. Die Verwendung von Zylindergeometrien zur Berechnung der Produktion eignet sich dabei als analytisches Instrument, um ein Modell für die ablaufenden physikalischen Prozesse zu haben und die Abhängigkeit zwischen relevanten Parametern (Energie, Strom, Energiedepositionierung, Plutoniumproduktion) studieren zu können. Weiterhin liegen experimentelle Daten vor, die eine Validierung der Simulationsmodelle ermöglichen. Darüber hinaus sind die Simulationsergebnisse der verwendeten kompakten Zylindergeometrien des Modells trotz der Vernachlässigung der notwendigen Kühlvorrichtungen vergleichbar mit Daten tatsächlich verwendeter Targets.

³⁷ Zu weiteren Parametern, wie dem Intensitätsprofil des Protonenstrahles, der durch die Protonenbestrahlung verursachten Veränderung des Targetmaterials (Abbrand) und der Energiedepositionierung im Target siehe Anhang B.1 sowie [Englert 2004, Englert et al. 2006].

Abbildung 3: Schematische Darstellung von vier verschiedenen Nutzungsweisen von Spallationsneutronenquellen.



Schematische Darstellung von vier verschiedenen Nutzungsweisen von Spallationsneutronenquellen, die in zwei Gruppen eingeteilt sind. a) Nutzung in einer Forschungsneutronenquelle: möglichst viele Neutronen verlassen das Target. b) Nutzung zur Materialproduktion: möglichst viele Neutronen werden von U-238 eingefangen und bilden Pu-239. c) Die produzierten Neutronen verlassen das Target und werden direkt im umschließenden Produktions-Blanket genutzt. d) Produzierte Neutronen aus dem Target werden zu einem Produktions-Blanket geführt. In den Szenarien a) und b) sind Protonen-Target und Produktions-Blanket identisch, in den Szenarien c) und d) hingegen sind Protonen-Target und Produktions-Blanket räumlich voneinander getrennt.

Tabelle 4: Pu-239-Produktion pro Jahr verfügbare Strahlzeit in realistischen Targets (Zylindergeometrie)

Targetgröße (benötigtes Uran)	Größe der Anlage (Dimensionierung Beschleuniger)	Technologische Dynamik Beschleunigerentwicklung		
		konservativ 0,1 mA	aktuell/moderat 1 mA	progressiv 10 mA
Kleines Target 0,24 t U-238, Zylinder Radius = 10 cm, Länge = 40 cm	klein 150 MeV	1 g	10 g	0,1 kg
	mittel 500 MeV	15 g	150 g	1,5 kg
	groß 1 GeV	46 g	460 g	4,6 kg
mittleres Target 2,2 t U-238, Zylinder, Radius = 25 cm, Länge = 60 cm	klein 150 MeV	4 g	40 g	400 g
	mittel 500 MeV	65 g	650 g	6,5 kg
	groß 1 GeV	220 g	2,2 kg	22 kg
Großes Target 19 t U-238 Zylinder, Radius = 60 cm, Länge = 90 cm	klein 150 MeV	5 g	50 g	500 g
	mittel 500 MeV	0,1 kg	1 kg	10 kg
	groß 1 GeV	0,36 kg	3,6 kg	36 kg

Jährliche Plutoniumproduktion (siehe ausführlicher Anhang B.3) bei direktem Beschuss von Urantargets - ohne weitergehende Optimierung (z.B. durch Moderation der Neutronen) - in Abhängigkeit von der Größe des Urantargets, der Anlagengröße (ausgedrückt durch die Protonenenergie) und der technologischen Dynamik (ausgedrückt im erreichten Beschleunigerstrom). Zylindergeometrien nähern realistische komplexe und gekühlte Targetgeometrien an. Je größer das Target desto weniger Neutronenverluste durch die Oberflächen treten auf, d.h. die Produktionsrate steigt überproportional.

Die Tabelle 4 zeigt verschiedene Produktionsraten (unter Annahme der Nutzungsweise in Abbildung 3a und 3b für eine konservative, eine moderate und eine progressive Annahme für den zur Verfügung stehenden Beschleunigerstrom sowie für verschiedene Anlagengrößen (ausgedrückt in der Protonenenergie) und verschiedene Targetgrößen. Für eine konservative Annahme für den Beschleunigerstrom (< 1mA) erreichen die Produktionsraten nur für sehr große Targets in einer großen Anlage die Größenordnung der oben diskutierten Signifikanzschwelle von 500 g Plutonium pro Jahr. Für eine moderate Annahme des Beschleunigerstroms (1mA) sind schon mittlere Anlagengrößen mit mittelgroßen Targets relevant (mit ca. 2 Tonnen eingesetztem Uran wird hier nur sehr wenig Ausgangsmaterial benötigt, um relevante Mengen an Plutonium zu erbrüten). Auch kleine Anlagen (mit 240

kg Uraneinsatz) erreichen bei Annahme hoher Protonenenergien die Signifikanzschwelle. Für progressive Annahmen des Beschleunigerstroms (10 mA), wie sie in Zukunft zu erwarten sind, kann schon mit relativ kleinen Beschleunigern und Targets eine relevante Plutoniummenge pro Jahr produziert werden. Hinzu kommt die Überlegung, dass gerade bei kleinen Anlagen auch mehrere dieser Anlagen genutzt werden könnten, um die Produktionsrate zu vervielfachen (vgl. ausführlicher Anhang B.3 und [Englert et al. 2006]).

Der Unterschied zum im Abschnitt 3.3 diskutierten Maximalszenario, in dem große Anlagen bei progressiver Annahme für den Beschleunigerstrom etwa doppelt soviel Plutonium produzieren könnten, beruht auf den jetzt berücksichtigten Neutronenverlusten durch die Grundfläche des Zylinders, auf die der Protonenstrahl auftrifft. Mit relativ einfachen geometrischen Maßnahmen ließe sich jedoch die Produktionsrate der Zylinderberechnungen (Tabelle 4) wieder dem Maximalszenario annähern, z.B. indem der Strahl durch eine Bohrung erst in der Mitte des Zylinders auftrifft oder der Zylinder mit Neutronen reflektierenden Materialien umgeben wird (vgl. Anhang B.3). Dementsprechend sind die in Tabelle 4 angegebenen Produktionszahlen „konservative“ Abschätzungen, die in der Realität doch deutlich übertroffen werden könnten.

Ebenso blieb bei der Annahme eines direkten Protonenbeschusses von Urantargets unberücksichtigt, dass andere Targetmaterialien, die nicht aus Uran, sondern aus einem anderen Schwermetall bestehen (entsprechend Abb. 3c), verwendet werden könnten und dann das Brutblanket aus Uran zur Produktion von Plutonium räumlich vom eigentlichen Produktionstarget getrennt sein kann (Abb. 3d). In solchen Szenarien könnten die entstandenen Neutronen vor dem Erreichen des Brutblankets aus Uran noch geeignet moderiert (verlangsamt) werden und damit die Produktionsrate wiederum optimiert bzw. Probleme der Wärmeentwicklung adressiert werden. Dies könnte so weit getrieben werden, dass um das Spallationstarget eine Reaktorgeometrie aus Urantargets z.B. in Form von Brennelementen erstellt wird, um Plutonium in optimierter Weise zu erbrüten.

3.5 Klassifikation von Produktionsszenarien.

Um die Vielzahl der Möglichkeiten, mit SNQs Plutonium zu produzieren, besser einordnen zu können, wurde eine grobe Klassifikation nach zwei einfachen Kriterien entwickelt. Zunächst kann man die konstruktive Unterscheidung treffen, ob das Target zur Neutronenproduktion gleichzeitig als Blanket zur Plutoniumproduktion genutzt wird (Abb. 3a, 3b). Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass die Plutoniumproduktion räumlich getrennt von der Neutronenproduktion stattfindet (Abb. 3c, 3d).

Tabelle 5: Verschiedene Szenarien der Nutzung einer Spallationsneutronenquelle zur Materialproduktion

	Target = Blanket	Target ≠ Blanket
Umfunktionierte Forschungsanlage	1 Forschungsanlage direkt (Uran-Target oder <i>Beam-Dump</i> aus Uran)	2 Forschungsanlage indirekt Produktion an Bestrahlungsposition
Dezidierte (verdeckte) Produktionsanlage	3 Einfache Produktionsanlage (Uran-Target)	4 Optimierte Produktionsanlage (optimierte Target-Blanket Konfiguration)

Realistische Szenarien des Einsatzes einer SNQ zur Produktion von Plutonium hängen darüber hinaus erheblich vom Akteur und dem ursprünglichen Zweck der Anlage ab. Als zweites Kriterium kann daher verwendet werden, ob eine Anlage ursprünglich für Forschungszwecke konzipiert wurde und dann erst später zur Produktion von kernwaffenrelevantem Material umfunktioniert wurde. Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass der Produktionszweck von Anfang an in das Design der Anlage aufgenommen wurde. In diesem groben Raster lassen sich die wesentlichen denkbaren Produktionsszenarien einordnen und es ergeben sich vier grundsätzliche Szenarien, wie in Tabelle 5 dargestellt.

Nicht für alle Szenarien wurden detaillierte Rechnungen durchgeführt, da einige schon mit groben Abschätzungen als nicht sonderlich relevant einzustufen sind (Szenario 2 s.u.) oder im Sinne einer ersten Abschätzung des Proliferationspotentials schon von anderen Autoren bearbeitet wurden (Szenario 4 s.u.).

- 1. Forschungsanlage direkt

In einer Forschungsneutronenquelle könnte ein Urantarget eingebaut, direkt mit Protonen beschossen und damit zur Plutoniumproduktion genutzt werden. Größere Targetdimensionierungen oder höhere Beschleunigerströme würden auch höhere Produktionsraten ergeben. Szenarien für die Nutzung des Targets einer Forschungs-SNQ zur Plutoniumproduktion sind eher relevant für hohe Energien und Ströme, da die Targetdimensionierung üblicherweise klein ausfällt, um dem für Forschungszwecke gültigen Optimierungsziel eines möglichst hohen Neutronenverlustes durch die Oberflächen des Targets gerecht zu werden (vgl. Berechnungen für existierende Forschungsanlagen in Anhang B.4).

Ein zweites Szenario in einer Forschungsanlage ergibt sich, wenn der sogenannte *Beam-Dump* (Strahlvernichter), der bei Wartung und Konstruktion³⁸ der Anlage von Bedeutung ist, zur Produktion genutzt wird, wobei wiederum in einem Urantarget direkt kernwaffenrelevante Materialien erzeugt werden können. Berechnungen eines realistischen *Beam Dumps* zur Wartung und Konstruktion der Anlage zeigen (Anhang B.4), dass auch hier relevante Mengen Plutonium erzeugt werden können, vor allem wenn der *Beam-Dump* für eine heimliche Produktion optimiert wurde. Zur Abschätzung der dabei möglichen Produktionsraten können die Angaben zu den Szenarien 3 (vgl. Zahlenwerte der Tabelle 4) oder 4 (s.u.) angenommen werden. Bei einer dauerhaften Nutzung des *Beam Dumps* zu einer verdeckten Produktion würden allerdings der gesamte oder ein Teil des Protonenstrahles nicht mehr für den Betrieb der SNQ als Forschungsneutronenquelle zur Verfügung stehen.

- 2. Forschungsanlage indirekt

Direkt im Moderator-Tank oder in der Nähe des Targets könnte in einer Forschungs-SNQ eine Bestrahlungsposition für ein zusätzliches Produktionsblanket aus Uran eingebaut oder genutzt werden. Das Uranbrutblanket ist dann getrennt vom Neutronenproduktionstarget. Dieses Szenario ist eher unwahrscheinlich, da Bestrahlungspositionen üblicherweise klein dimensioniert sind, relevante Produktionsmengen von Plutonium aber nur für größere Schwermetallmengen auftreten. Allerdings wären auch Bestrahlungspositionen für größere Materialmengen im Moderator vorstellbar und es müsste daher auch detaillierter über dieses Szenario nachgedacht werden.

Ein zweites Szenario wäre die Nutzung der Neutronen am Ende eines Strahlrohres zur Bestrahlung eines Uranblankets in einer Forschungs-SNQ. Dieses Szenario ist

38 Bei Konstruktion und Wartung der Anlage muss der Protonenstrahl, wenn er justiert wird, im *Beam Dump* vernichtet werden.

sehr unwahrscheinlich, da der Neutronenfluss am Ende eines Strahlrohres um Größenordnungen zu klein ist, um eine Produktion oberhalb der Signifikanzschwelle zu erreichen.

- 3. Einfache Produktionsanlage

Ein Akteur könnte eine oder mehrere kleine, verdeckte und einfach konzipierte Produktionsanlagen mit je einem oder mehreren kleinen Beschleunigern errichten. Geht man von einer relativ simplen Anlage aus, wäre es das einfachste, zunächst direkt mit dem Protonenstrahl auf ein Urantarget zu schießen (Target=Blanket). Mit einem Cyclotron als Beschleuniger wäre eine solche Anlage insgesamt klein und damit gut verdeckt zu errichten und zu betreiben. Die Produktionsraten, die oben für die Zylindergeometrie errechnet wurden (vgl. Tabelle 4), können hier zur Abschätzung des Produktionspotentials verwendet werden. Sogar mit einem kleinen Beschleuniger mit 1 mA Strom und Energien um 400 MeV sind Produktionsraten von bereits über 500 g pro Jahr verfügbare Strahlzeit möglich (vgl. Anhang B.3). Bei mehreren kleinen Anlagen multipliziert sich diese Menge entsprechend. Lässt man den Strahl im Zentrum des Zylinders statt auf einer seiner Grundflächen auftreffen und verwendet zusätzlich Neutronenreflektoren, so können die Produktionsraten entsprechend Tabelle 4 im Vergleich zum einfachen Zylindermodell leicht verdoppelt werden und sich wieder dem Maximalszenario (siehe Tabelle 3 und Abschnitt 3.3 sowie Anhang B.3) annähern.

- 4. Optimierte Produktionsanlage

Eine technisch versiertere Version einer kleinen Anlage, so wie im 3. Szenario beschrieben, könnte zunächst ein anderes Targetmaterial zur Erzeugung der Neutronen verwenden und dieses mit einer Uranhülle umgeben. Komplexere Targetkonzepte wie das Split-Target Design (siehe Anhang B.1), können so dazu genutzt werden, vermutlich auftretende Probleme mit der Abfuhr entstehender größerer Wärmemengen zu lösen (z.B. könnten Targetplatten aus Tantal mit entsprechend sehr guten Wärmeeigenschaften zum Einsatz kommen).³⁹ Die Abschätzung der Produktionsraten erfolgt dann ähnlich wie in 3. Szenario (Tab. 3 und 4), es sind allerdings mit verbesserten Kühlmöglichkeiten höhere Werte für Strom und Energie der SNQ erreichbar und dadurch höhere Produktionsraten.

Die Komplexität der Anlage kann noch weiter gesteigert werden durch geeignete Moderation der Neutronen, bis hin zu subkritischen Reaktoranlagen, die von einer SNQ gespeist werden.⁴⁰

Eine amerikanische Studie kommt zu dem Schluss, dass mit einer moderat ausgelegten Spallationsanlage (z.B. 1mA, 400 MeV) und etwa 10 t Uran im Reaktorteil Produktionsraten von 2kg Pu-239 pro Jahr Strahlzeit erreicht werden können. Die Signifikanzschwelle von 500 g/a kann schon mit einer konservativen Annahme bzgl. des Stroms von 0,25 mA und Energien um 500 MeV erreicht werden (zu Details siehe [Riendeau et al. 1999]).

39 Eine ausführlichere Diskussion der Wärmedeponierung und mögliche Lösungen für die Kühlproblematik findet sich in [Englert 2004, Englert et al. 2006].

40 Eine solche subkritische Anordnung eines beschleunigergetriebenen Systems (*Accelerator Driven System* – ADS), eventuell auch unter Nutzung von leicht angereichertem Uranbrennstoff, kann die Produktionsrate auch über die berechneten Werte des Maximalszenarios (Abschnitt 3.3) eines Beschusses von Natururan hinaus durch Erhöhung der Neutronenmultiplikation steigern.

3.6 Zusammenfassung

Die Untersuchung des Beschusses einer Zylindergeometrie aus natürlichem Uran mit Protonen durch Simulationsrechnungen mit MCNPX hat gezeigt, dass maximale Produktionsraten bis zu etwa 6 kg Pu-239 pro Jahr verfügbarer Strahlzeit mit der Technologie heutiger Spallationsanlagen (etwa 1 GeV, 1 mA) erreicht werden können. Einschränkend gilt, dass solche Anlagen heute noch teuer und sehr groß sind. Kleinere, aber immer noch signifikante Produktionsraten (0,5 kg/a) können sogar mit moderaten Beschleunigerparametern (in der Größenordnung von 1 mA Beschleunigerstrom und 500 MeV Protonenenergie) ohne Optimierung der Produktionsbedingungen erreicht werden. Zukünftig sind mit Hochstromanlagen (mehrere Milliampere) Produktionsraten von einigen zehn Kilogramm pro Jahr denkbar. Die Ergebnisse der Berechnungen haben auch gezeigt, dass das erzeugte Plutonium zu 99 % aus dem Isotop Pu-239 besteht und damit besonders waffenrein und daher ideal zum Bau von Kernwaffen geeignet ist (vgl. genauer in Anhang B.1).

Wenn kein größeres Target (bzw. ggf. spezielles Brutblanket) zur Plutoniumproduktion verwendet wird, ist die hierbei benötigte absolute Menge an Uran im Vergleich zu einem typischen Produktionsreaktor deutlich geringer und es kann natürliches (sogar abgereichertes) Uran zur Plutoniumproduktion verwendet werden (vgl. Tab. 4 und Anhang B.5). Bei der Wiederaufarbeitung, der Abtrennung des Plutoniums aus dem bestrahlten Target, muss daher ebenfalls nur eine vergleichsweise geringe Menge an Material umgesetzt werden.⁴¹ Die Beherrschung der Wiederaufarbeitungstechnologie selbst kann dabei nicht als eine prinzipielle technische Hürde betrachtet werden (siehe Anhang B) [Gilinsky 2004]. Verfügt ein Akteur jedoch noch nicht über eine (zivile) Wiederaufarbeitungskapazität, müsste er eine kleine verdeckte (aber technisch wenig anspruchsvolle) Anlage aufbauen, um das Plutonium aus dem Produktionsblanket (oder –target) gewinnen zu können.

Aufgrund der hohen Abhängigkeit der Produktionsrate von den diskutierten Parametern (insbes. Protonenenergie und Beschleunigerstrom) ist es schwierig, generalisierte Aussagen zu Produktionsraten in realistischen Anlagen zu machen. Festzuhalten bleibt, dass im Prinzip signifikante Mengen oder Mengen jenseits der Signifikanzschwelle von 500 Gramm pro Jahr hergestellt werden können. Um die tatsächlichen Produktionspotentiale zu quantifizieren ist es daher unerlässlich, das konkrete Design einer bestimmten Anlage zu betrachten. Die Klassifikation von Szenarien versuchte daher möglichst viele relevante Anlagenauslegungen in Betracht zu ziehen.

Tabelle 6 fasst noch einmal die Relevanz der untersuchten Szenarien für ein mögliches Proliferationsszenario zusammen. Von allen Szenarien ist nur die Benutzung eines Strahlrohres einer SNQ in Szenario 2 irrelevant. Für alle anderen Szenarien besteht prinzipiell die Möglichkeit, kernwaffenrelevantem Material (Pu-239) in Mengen oberhalb der Signifikanzschwelle (0,5 kg/a) bis hin zu einigen 10 kg pro Jahr verfügbare Strahlzeit herzustellen. In einigen Szenarien (insbes. Szenario 4) gilt dies auch für relativ kleine Beschleunigeranlagen. Anlagen, die zum Zweck der Plutoniumproduktion gebaut und konzipiert werden, sind nach Ansicht der Autoren auch diejenigen mit dem größten Proliferationspotential. Diese Szenarien besitzen nicht nur eine große Flexibilität im Anlagenaufbau, auch die Verwendung sehr kleiner und billiger Beschleuniger (eventuell in größerer Anzahl) ist denkbar und viele der benötigten Komponenten sind bereits kommerziell erhältlich oder werden es in absehbarer Zukunft sein.

41 Die Menge an umzusetzendem Uran hängt von der erreichten Plutoniumkonzentration am Ende der Bestrahlungszeit ab. Für eine mittlere Anlage mit 500 MeV und progressiver Stromaufnahme von 10 mA liegt die Konzentration von Plutonium in einem Uranzylinder nach einem Jahr bei 2,4 kg Pu-239 pro t Uran. Typische Vergleichswerte für Reaktoren und Spallationsanlagen werden in Anhang B.5 Tabelle 10 und Tabelle 11 angegeben.

Tabelle 6: Grobe Einteilung der Proliferationsrelevanz durch vier Szenarien der Nutzung einer Spallationsneutronenquelle zur Materialproduktion

	Target = Blanket	Target ≠ Blanket
Umfunktionierte Forschungsanlage	1 Forschungsanlage direkt Relevant	2 Forschungsanlage indirekt Nicht sehr relevant
Dezidierte (verdeckte) Produktionsanlage	3 Einfache Produktionsanlage Sehr relevant	4 Optimierte Produktionsanlage Sehr relevant

Bislang haben wir unsere Aussagen vollständig auf eine mögliche Plutoniumproduktion konzentriert. Im Anhang B wird auch etwas detaillierter auf die Produktionsmöglichkeit von weiteren kernwaffenrelevanten Materialien (Uran-233 aus Thorium-232 und Tritium aus Helium-3) mit Hilfe einer SNQ eingegangen. Die Uran-233-Produktion wäre etwas weniger effektiv im Vergleich mit einer Plutoniumproduktion aus Uran: Während mit einer Protonenenergie von 1 GeV und einem Materialeinsatz von 30 Tonnen Uran-238 (bzw. Thorium-232) 3,7 Kilogramm Plutonium pro Milliampere Beschleunigerstrom und Jahr verfügbare Strahlzeit produzierbar sind, wäre für Uran-233 nur eine Menge von 2,3 Kilogramm erreichbar. Die Tritiumproduktion wäre aufgrund der Notwendigkeit, ein komplexeres Target-Blanket-Design zu realisieren, deutlich aufwändiger. Produktionsraten im Bereich von 5 bis 15 Gramm Tritium pro Milliampere (mA) Beschleunigerstrom und Jahr Strahlzeit bei einer Protonenenergie von 1 GeV sind zu erwarten.

Zusammen mit der Dynamik in der Entwicklung von Beschleunigertechnologien und SNQs, die in den nächsten Jahren und Jahrzehnten erwartet werden kann, zeigen die quantitativen Ergebnisse, dass es essentiell ist, die zukünftigen Entwicklungen genau zu beobachten und im Sinne einer präventiven Rüstungskontrolle zu begleiten sowie frühzeitig zu reagieren. Da die Technologien gerade die Schwelle der Kommerzialisierung erreichen und eine weltweite Verbreitung der Technologie erst begonnen hat, ist es möglich, in dieser frühen Phase Kontrollmechanismen (z.B. *Safeguards*, Exportkontrollen, proliferationsresistente Auslegungen) auszuarbeiten und zu implementieren, um eine rein friedliche Nutzung von Spallationsneutronenquellen zu gewährleisten.

3.7 Empfehlungen und Ausblick

Die Empfehlungen beziehen sich auf drei mögliche Umgangsweisen, das Proliferationspotential von Spallationsanlagen zu mindern. Zunächst sollte die Anlage selbst proliferationsresistent gestaltet werden, zweitens kann der Export von relevanten Anlagenkomponenten kontrolliert werden und es könnten drittens Überwachungsmaßnahmen (z.B. *Safeguards* der IAEA) durchgeführt werden.

Die wichtigste Maßnahme zur Unterstützung einer proliferationsresistenten Gestaltung von SNQs, die das Umfunktionieren einer Anlage für Forschungszwecke erschwert, ist der vollständige Verzicht auf die Verwendung von Uran als Targetmaterial. Uran bietet zwar die beste Neutronenausbeute, dennoch könnte diese Maßnahme relativ einfach umgesetzt werden, da Uran relativ schlechte Bestrahlungseigenschaften aufweist [Broome 1996] und sich zur Kühlung leistungsstarker Megawatt-Anlagen Flüssigmetalltargets aus Blei oder Quecksilber wohl im Prinzip besser eignen würden (zur Wärmeproblematik siehe Anhang B.1).

Eine baulich auf den Einsatz von Flüssigmetall ausgelegte Spallationsquelle lässt sich nur schwer ohne größeren Umbau mit einem festen Target aus Uran betreiben. Allerdings sind ein Umbau oder eine modulare Bauweise und der Beschuss eines Uran-Targets mit Protonen an anderer Stelle (*Beam Dump*) damit nicht prinzipiell auszuschließen.

Sollten solche baulichen Maßnahmen nicht ausreichen,⁴² kann der Verzicht auf den Einsatz von Uran in einer Spallationsneutronenquelle auch mit diversen Überwachungsmaßnahmen verifiziert werden:

- Detektierung von möglichen Brutmaterialien im Spallationstarget und in den Moderatoreinbauten, die auf Grund des Materialverschleißes häufig (Moderatoreinbauten allerdings nur gelegentlich) ausgetauscht werden müssen. Zur Detektion können verschiedene gängige Messverfahren eingesetzt werden. So könnte das Vorhandensein von Spaltmaterial im unbestrahlten Target etwa durch „Neutronenbefragung“ („*neutron interrogation*“) mit einem tragbaren Neutronengenerator vor seinem Einbau in die Anlage ausgeschlossen werden.⁴³
- Neutronendetektion im Aufbewahrungsbereich für genutzte Targets, um die Produktion waffenverwendbarer Nuklearmaterialien entdecken zu können.
- Luftfilter und Wischproben zur Detektion von bestimmten Spaltprodukten in der Targethalle und an anderen relevanten Orten.

Bei Überwachungsmaßnahmen käme es auch darauf an, dass *Safeguards* nicht nur auf Materialien angewendet werden und Anlagen erst dann unter Kontrollmaßnahmen fallen, wenn entsprechende Mengen Material in der Anlage verwendet werden, sondern dass *Safeguards* direkt auf Anlagen (inkl. des Anlagendesigns) angewendet werden könnten (vgl. ausführlicher Anhang C.3). Dies reflektiert den Umstand, dass es um den Einsatz der Spallationstechnologie selbst geht und um ihr Potential für verschiedene Produktionsszenarien von unterschiedlichen kernwaffenrelevanten Materialien.

Um den heimlichen Aufbau und Betrieb einer Anlage zu erschweren, sollte der Export von relevanten Beschleunigerkomponenten für Hochstromanlagen weltweit kontrolliert werden (z.B. Protonenquellen, RFQs [Vorbeschleuniger], Hochfrequenzklystrons). Die Anzahl der Hersteller für solche Komponenten ist überschaubar und sie befinden sich vornehmlich in den Industrienationen. In den USA fallen etwa beschleunigergetriebene Reaktorsysteme sowie Subsysteme zur Erzeugung kernwaffenrelevanter Materialien (U-233, Pu, Tritium) bereits unter Exportkontrollen [DoE 2001], wenn auch das Ausmaß noch nicht befriedigend ist.⁴⁴

Durch die derzeitigen möglichen Ausnahmen bei der Anwendung von *Safeguards* auf Nuklearmaterialien sind Lücken vorstellbar, die zur Produktion von nuklearwaffenrelevantem Material mit Hilfe von Spallationsneutronenquellen genutzt werden könnten. So können

42 Eine weitere Maßnahme könnte etwa der Verzicht auf Strahlaufweitung sein oder andere geometrische Einschränkungen im Target/Blanket Bereich.

43 Andere vom Protonenstrahl erreichbare Stellen in der Anlage, wie insbesondere der *Beam-Dump*, müssten ebenfalls untersucht werden. Hierfür wären geeignete Maßnahmen aufzufinden.

44 Die „*Regulations of the Nuclear Regulatory Commission (NRC)*“ der USA regeln z.B. unter Titel 10 des *Code of Federal Regulations (CFR)*“ unter Abteilung 110 (10-CFR Part 110) „*EXPORT AND IMPORT OF NUCLEAR EQUIPMENT AND MATERIAL*“ sämtliche nuklearbezogenen Transfers und beziehen sich dabei an mehreren Stellen auf beschleunigergetriebene subkritische Systeme, die aber nur ab einer Leistung von 5 MWe unter Exportkontrolle fallen. Es fehlt jedoch eine detaillierte Liste von Gütern, wie sie in 10-CFR-110 als Appendix etwa für Anreicherungstechnologie usw. vorhanden ist. Beschleuniger werden nicht explizit erwähnt, allerdings gibt es Raum für Interpretationen, ob der Beschleuniger ein Teil der Nutzungsanlage (*utilization facility*) ist. Entsprechende Paragraphen oder auch nur Hinweise auf Beschleuniger und beschleunigergetriebene Anlagen finden sich nicht in den „*Guidelines for the Export of Nuclear Material, Equipment and Technology*“ IAEA-INF/CIRC 254/rev.8 Part 1 und IAEA-INF/CIRC 254/rev.7 Part 2 die von Mitgliedern der *Nuclear Suppliers Group (NSG)* angewandt werden.

10 t Natururan bzw. 20t abgereichertes Uran, sowie 20 t Thorium⁴⁵ von *Safeguards* ausgenommen werden. Diese Menge ist jedoch nach den obigen Ausführungen je nach Szenario schon ausreichend für eine relevante Produktion. Die Rolle von Tritium als kernwaffenrelevantem Material wird nach wie vor unterschätzt; bisher gibt es kein etabliertes Kontrollregime, das Tritium umfassen würde, und Spallationsanlagen können hier ebenfalls zur Produktion wesentlicher kernwaffenrelevanter Materialien für fortgeschrittene Kernwaffenprogramme genutzt werden (vgl. Anhang B.7).

Auch fallen Spallationsanlagen nicht direkt unter die Definition einer „Anlage“ (*facility*) nach den *Comprehensive Safeguards* Abkommen der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO). Sinnvoll wäre es hier, in geeigneter Weise die IAEO-Definition einer „Anlage“ so auszuweiten, dass nicht nur heute bekannte Kernreakortypen darunter fallen. Es wäre nötig, alle Anlagen mit Neutronen produzierenden Prozessen, die ausreichend Neutronenflüsse bereitstellen, um signifikante Mengen an Plutonium zu erbrüten bzw. eine bestimmte Produktionsrate anderer kernwaffenrelevanter Materialien (wie Uran-233 oder Tritium) übersteigen, in solch eine Definition mit aufzunehmen (ein konkreter erster Vorschlag wird in Anhang C.3 vorgestellt).⁴⁶ Dies würde dazu führen, dass die Aufmerksamkeit auch auf Anlagentypen gelenkt wird, die historisch bisher nur eine untergeordnete Rolle bei der Produktion von kernwaffenrelevanten Materialien spielten, jedoch genug – und zukünftig weiter wachsendes Potential für eine signifikante Rolle aufweisen. Aufgrund unserer Berechnungen zeigt sich, dass Spallationsquellen ein wichtiges Beispiel dafür sind.

Da heute noch keine unmittelbaren Proliferationsgefahren auf der Basis von SNQs drohen und auch kaum von derzeit bereits existierenden Anlagen ausgehen, ist ein ausreichender Zeithorizont gegeben, um angemessene präventive Maßnahmen rechtzeitig zu etablieren.

Auf Grund der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung werden folgende sinnvolle Anschlussprojekte vorgeschlagen:

- Erstellung einer detaillierteren Liste von beschleunigerbezogenen Gütern, die unter Exportbeschränkungen etwa der „*Nuclear Suppliers Group*“⁴⁷ - oder auch einzelner Länder fallen könnten.
- Ausformulierung von Überarbeitungsvorschlägen für bestimmte Definitionen der IAEO, so dass sämtliche neutronenproduzierende Technologien mit ausreichendem Potential für eine relevante Produktion kernwaffenrelevanter Materialien in den Blick geraten (Spallation, Kernfusion u.a.).
- Ausarbeitung von konkreten Überwachungsmaßnahmen, die sich für die Kontrolle von SNQs eignen.
- Erarbeitung von detaillierten technischen Empfehlungen zur proliferationsresistenten Gestaltung von SNQs, die einen möglichen militärischen Gebrauch durch intrinsische technische Maßnahmen erschweren.

Die Durchführung der oben genannten Schritte impliziert eine Verbreiterung des Expertenkreises. Es wäre daher notwendig, dass sich eine internationale Expertengruppe findet. Die Teilnehmer einer solchen Gruppe sollten sich aus Wissenschaftlern und Ingenieuren der heutigen Spallationsneutronenquellen, aus kompetenten unabhängigen Nichtverbrei-

⁴⁵ Zur Produktion von U-233 aus Thorium siehe Anhang B.6.

⁴⁶ Dies würde vor allem auch Fusionsanlagen mit einbeziehen müssen.

⁴⁷ Vgl. *Trigger List* der *Nuclear Suppliers Group* (IAEO-INFCIRC 254/rev.8 Part 1 u. rev.7 Part 2). Hier ist allerdings gewisse Vorsicht geboten, da Exportkontrollmaßnahmen, die auf Dauer angelegt sind, als eine Art „Technologie-Embargo“ seitens der nuklearen Lieferländer interpretiert werden könnten.

tungsexperten, Vertretern der Politik, Vertretern der relevanten Industrie und Experten der IAEA zusammensetzen.

Ein weiteres Anschlussprojekt basierend auf der vorliegenden Untersuchung wäre eine detailliertere Analyse der Szenarien, insbesondere des Szenarios 4 einer verdeckten kleinen Produktionsanlage (Wärmeabfuhr, Blanketkonzeption mit Moderation etc.). Eine solche Untersuchung sollte dann auch verstärkt den politischen und sozio-ökonomischen Kontext mit berücksichtigen und eine Einteilung der Szenarien nach möglichen Akteuren, zur Verfügung stehenden Mitteln und technischem *Know-How* vornehmen, um weitere Aussagen bezüglich der Proliferationsrisiken solcher optimierter Produktionsszenarien zu machen.

4. Beiträge zum Konzept Präventiver Rüstungskontrolle im Nuklearbereich

Die Suche nach Möglichkeiten der präventiven Rüstungskontrolle im Nuklearbereich bedeutet

- erstens, geeignete technische Möglichkeiten aufzufinden, die es erlauben, proliferationsrelevante Verletzungen internationaler Verträge möglichst frühzeitig zu entdecken,
- zweitens eine möglichst vollständige und nicht mehr rückholbare Beseitigung von vorhandenen Beständen waffentauglicher Nuklearmaterialien zu ermöglichen,
- drittens die Antizipierung der proliferationsrelevanten Potentiale von neuen Nukleartechnologien und
- viertens die proliferationsresistente Gestaltung von sensitiven Nukleartechnologien, die zur Herstellung kernwaffenrelevanter Materialien genutzt werden können oder in denen mit waffenfähigen Materialien umgegangen wird.

So werden die technologische Dynamik und technikbedingte Faktoren in den Blick genommen und es wird das Ziel verfolgt, vorbeugende und rechtzeitige Eingriffsmöglichkeiten zu entwickeln, mit denen angemessen und effektiv agiert werden kann.

Beispielfälle aus der jüngeren Vergangenheit (Plutoniumproduktion und -abtrennung in Nord-Korea, Anreicherungstechnologien im Iran und Irak) stellen nochmals heraus, wie auffällig der *Dual-use*-Charakter von wesentlichen nuklearen Technologien und Materialien ist. Es wird überdeutlich, dass Technologien, mit denen kernwaffenrelevantes Material hergestellt werden kann, prinzipiell als ebenso problematisch einzustufen sind, wie die bestehenden Bestände an kernwaffenrelevanten Materialien. Im Rahmen des Konzeptes präventiver Rüstungskontrolle sollen solche Technologien und der Umgang mit entsprechenden Materialien möglichst rechtzeitig untersucht und Vorschläge für adäquate Umgangsweisen entwickelt werden.

Dabei bleiben nukleare *Safeguards* (und andere Maßnahmen des physischen Schutzes) unverzichtbar. Aber sie sind dringend ergänzungsbedürftig, da sie das Ziel der nuklearen Nichtverbreitung letztlich nicht sicherstellen können. Dies betrifft zum einen die Neuentwicklung von Methoden nuklearer Verifikation. Zum anderen geht es um die Erhöhung der intrinsischen Barrieren gegen horizontale und vertikale Proliferation bereits auf der technologischen Ebene. Dazu wird der Ansatz der Proliferationsresistenz verfolgt. Die Gestaltung von Technologien und technologischen Umgangsweisen sind dabei der zentrale Punkt. Das Ziel ist, dass *Safeguards* zu aussagekräftigeren und rechtzeitigeren Ergebnissen führen können und dass die Zugriffsmöglichkeit auf waffenfähige Nuklearmaterialien möglichst weitgehend vermieden wird. Optimal wäre, wenn ein vollständiger Verzicht auf den direkten Zugriff auf waffenfähige Nuklearmaterialien erreicht werden könnte. Die proliferationsresistente Auslegung von nuklearen Technologien kann aber auch zum Auswahlkriterium für die Entscheidung über die Technologienutzung werden. Dazu müssen auch Alternativen des technologischen Zugangs für bestimmte als unverzichtbar angesehene Zwecke betrachtet werden (zum Beispiel im Bereich der Urananreicherungstechnologien). Im Extremfall müsste auch der Verzicht auf bestimmte riskante, proliferationsförderliche Technologien in Erwägung gezogen werden.

Das Konzept der Proliferationsresistenz ist auch deshalb interessant, weil Vorsicht geboten ist bei allen Formen „nachsorgender Kontrolle“. Exportkontrolle wird beispielsweise zunehmend fragwürdig, da sie zur weiteren Destabilisierung der internationalen Bemühungen um nukleare Nichtverbreitung führt. Eine stabile, faire und gerechte internationale Vorgehensweise müsste auf einer allgemein akzeptablen Form des Technologiezugangs basieren. Mit einem Ansatz, der über *Safeguards* hinaus geht und die Notwendigkeit nachsorgender Kontrolle reduziert, besteht die Chance an den Kern der zivil-militärischen Ambivalenz nuklearer Materialien und Technologien heran zu kommen, um das Ziel einer effektiven und gerechten Nichtverbreitungspolitik zu unterstützen.

Das Forschungsprojekt untersuchte latente Proliferationsgefahren auf der Basis technischer Gegebenheiten, die Voraussetzungen für den Bau von Kernwaffen schaffen können. Dies ist ein wesentlicher Beitrag zur unumkehrbaren Abrüstung und zur Erhöhung der internationalen Stabilität durch Vermeidung von Proliferationsgefahren an ihrer Quelle. Frühzeitig und mit vorbeugender Absicht sollten geeignete Maßnahmen bedacht und dann auch ergriffen werden, die möglichst effektiv dem Ziel nuklearer Nichtverbreitung (d.i. Nichtweiterverbreitung und Abrüstung) dienen. Idealerweise würden erwartbare oder bereits bestehende Gefährdungen auf der Ebene der Techniknutzung durch eine entsprechende Gestaltung von Politik sowie bereits im Bereich der Forschungs- und Technikentwicklung selbst bearbeitet, um ersichtliche oder absehbare Risiken so weit wie möglich präventiv zu vermeiden. Zentrale und bereits heute antizipierbare zukünftige Gefahren für die internationale Stabilität werden dabei bewusst in den Blick genommen.

Ein wichtiges Ziel ist es, die Verwendung oder Wiederverwendung von Plutonium für Kernwaffenzwecke so sicher wie möglich auszuschließen. Irreversibilität der Abrüstung durch Beseitigung der aus den abgerüsteten Sprengköpfen freigesetzten Spaltstoffe und eine gezielte Effektivierung der Bemühungen um Nichtweiterverbreitung durch die Beseitigung von separiert vorliegenden Plutoniumbeständen im zivilen Bereich sind wesentliche Bestandteile eines Konzeptes präventiver Rüstungskontrolle. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden technisch-intrinsische Maßnahmen untersucht, die Plutoniummengen reduzieren können und den Zugriff auf Plutonium durch wirkungsvolle Barrieren erheblich erschweren (IMF- versus MOX-Option), und damit letztlich unabhängig von aktiven Maßnahmen wirksam sind.

Bereits existierende oder noch in Entwicklung befindliche – und damit neuartige – sensitive Nukleartechnologien, die prinzipiell zur Produktion von Waffenstoffen geeignet sind, sollten frühzeitig einer Analyse unterzogen werden, so dass Wege der internationalen Kontrolle oder der angemessenen, proliferationsresistenten Technologiegestaltung erschlossen werden können. Die Untersuchungen des hier vorliegenden Projekts haben sich auf das Technologiebeispiel der Spallationsneutronenquellen (SNQs) bezogen. Proliferationspotentiale durch SNQs werden quantifiziert und antizipierbar gemacht sowie erste Vorschläge zu einer proliferationsresistenteren Gestaltung der Technologie vorgelegt.

Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse sind somit Beispiele für naturwissenschaftlich orientierte Beiträge der Friedensforschung zur präventiven Rüstungskontrolle im Nuklearbereich.

5. Anhänge

A. Berechnungen zu Uranfreien Brennstoffen (IMF)

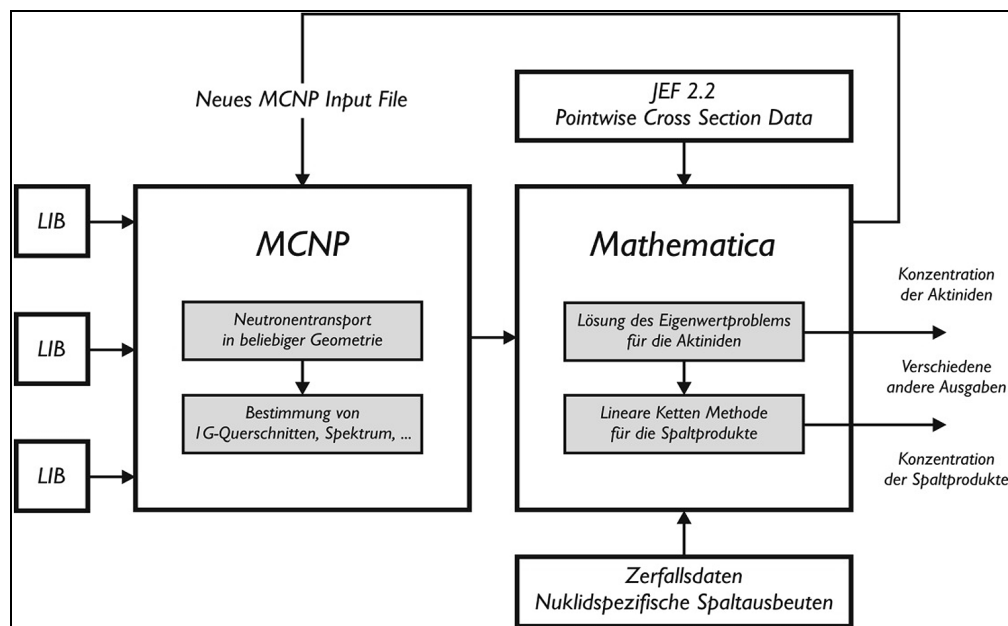
Berechnungsverfahren

Es wird angenommen, dass MOX- oder IMF-Brennstoffe in heute gängigen Leichtwasserreaktoren eingesetzt werden sollen. Entsprechend werden übliche Parameter heutiger Druckwasserreaktoren (wie geometrische Abmessungen, Temperaturen u.a.) bei den hier durchgeführten Simulationsrechnungen zugrunde gelegt.

Die zeitliche Veränderung der Brennstoffzusammensetzung im Reaktor wird durch die so genannten Abbrandgleichungen beschrieben. In diese gehen neben den momentanen Nuklidkonzentrationen auch die Zerfallskonstanten der radioaktiven Isotope und die effektiven Wirkungsquerschnitte für die Reaktion mit Neutronen ein. Die effektiven Wirkungsquerschnitte ergeben sich aus dem Energiespektrum der Neutronen im Reaktor, welches neben der konkreten Reaktorgeometrie wiederum von der momentanen Nuklidzusammensetzung im Brennstoff abhängt. Die Energieverteilung der Neutronen ist durch die Neutronentransportgleichung bestimmt. Damit ergibt sich als zu lösendes Problem ein gekoppeltes System von Differentialgleichungen (vgl. ausführlicher [Pistner 2006]).

Für die Analyse von uranfreien Brennstoffen wurde das Berechnungssystem MCMATH entwickelt [Pistner 2006]. Dieses koppelt in einem iterativen Verfahren den Neutronentransportcode MCNPX (zur Lösung der Neutronentransportgleichung) mit Abbrandroutinen zur Berechnung der Veränderung der Brennstoffzusammensetzung, die in Mathematica programmiert wurden (vgl. Abbildung 4).

Abbildung 4: Schema des Programmsystems MCMATH



MCMATH koppelt MCNP-Neutronentransportrechnungen mit einer Mathematica-Abbrandroutine, um Abbrandrechnungen durchführen zu können [Pistner 2006].

Dieses Abbrandprogrammsystem berücksichtigt etwa 50 Aktinide und 150 Spaltprodukte. Die Berechnungen werden in der Form von Zell-Abbrandrechnungen durchgeführt, d.h. die im Reaktor vorliegende regelmäßige Struktur der Brennstäbe bzw. Brennelemente wird in Form einer in der x-y Ebene periodischen, in z-Richtung unendlich fortgesetzten Einheitszelle (bestehend aus Brennstab, Brennstabhüllrohr und Moderator in einem quadratischen Gitter) modelliert. Für den Brennstabdurchmesser wurde ein Wert von 0,4095 cm, für das Hüllrohr ein Außendurchmesser von 0,475 cm und für die Kantenlänge des periodischen Gitters ein Wert von 1,3133 cm zugrunde gelegt. Für die Berechnung der Nuklidkonzentrationen wurde außerdem eine konstante mittlere Borkonzentration im Kühlmittel von 500 ppm angenommen.

Neben der Berechnung der abbrandabhängigen Nuklidzusammensetzung im Brennstoff ist das Programmsystem auch zur Bestimmung von abbrandabhängigen Reaktivitätskoeffizienten der Brennstoffe geeignet. Diese geben wesentliche Informationen für eine Einschätzung der Verwendbarkeit der Brennstoffe und hinsichtlich sicherheitstechnischer Aspekte.

Aufgrund der unterschiedlichen Isotopenzusammensetzung separiert vorliegender Plutoniumbestände im militärischen und zivilen Bereich werden die hier dargestellten Berechnungen sowohl für Reaktor-Plutonium (RPu) als auch für Waffen-Plutonium (WPu) durchgeführt (vgl. Info 4).

Für die untersuchten MOX-Brennstoffe wird einheitlich eine Schwermetалldichte des Brennstoffs von 9 g/cm^3 und eine für Druckwasserreaktoren typische Leistungsdichte von $38,3 \text{ W/g}$ verwendet. Bei diesen Brennstoffen kann dann der anfängliche prozentuale Plutoniumanteil variiert werden, wobei sich hier diese Anteile auf die thermisch spaltbaren Plutoniumisotope (Pu-239 und Pu-241) beziehen.

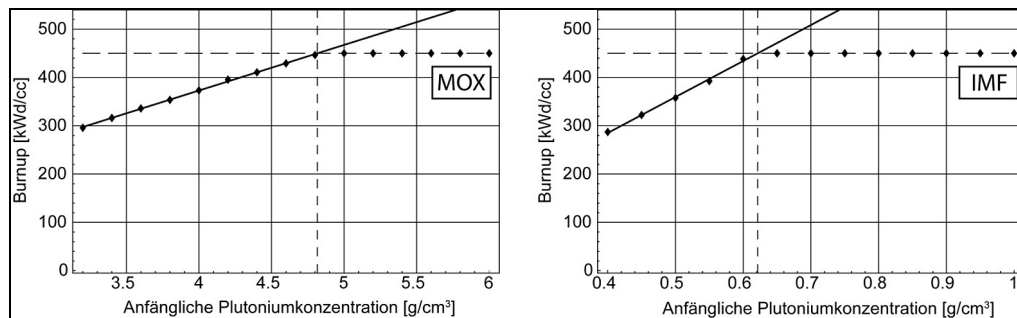
Uranfreie Brennstoffe (*inert matrix fuel*, IMF) befinden sich seit einigen Jahren weltweit in Entwicklung [Akie 1994], [Degueldre 2003], [IMF10 2006]. Eine möglicherweise geeignete Brennstoffmatrix für uranfreie Brennstoffe, die im Rahmen dieser Brennstoffentwicklungen als aussichtsreicher Kandidat untersucht wird, ist Zirkoniumdioxid, welches mit 5% Yttrium stabilisiert wird ($(\text{Y}, \text{Zr})\text{O}_2$), vgl. bspw. [Oversby 1999]. Eine solche Matrix mit einer Dichte von 5 g/cm^3 wird für die hier untersuchten IMF zugrunde gelegt.

Direkter Vergleich MOX-IMF

Mit den oben beschriebenen Verfahren werden zunächst Berechnungen für MOX-Brennstoffe mit verschiedenen Anfangskonzentrationen von RPu und WPu durchgeführt. Anschließend wird – ebenfalls für unterschiedliche Konzentrationen von RPu ($0,4\text{--}1,0 \text{ g/cm}^3$) und WPu ($0,35\text{--}1,0 \text{ g/cm}^3$) – der mögliche IMF-Einsatz untersucht. Alle Brennstoffe wurden bis zu einem maximaler Abbrand von 50 MWd/kg(SM) bei MOX bzw. 450 kWd/cm^3 für IMF entsprechend jeweils ca. 1300 Volllast-Tagen berechnet.⁴⁸ Für verschiedene Zielabbrände wurde dann unter Anwendung eines linearen Reaktivitätsmodells jeweils diejenige Brennstoff-Anfangszusammensetzung bestimmt, die aufgrund des Reaktivitätsverlaufs (vgl. Abbildung 6) das Erreichen des jeweiligen Zielabbrands ermöglicht. Die mit einem MOX-Brennstoff unter Einsatz von Reaktor-Plutonium (RPu) und mit IMF-Brennstoff mit RPu in Abhängigkeit von der anfänglichen Plutoniumkonzentration erreichbaren Zielabbrände sind beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt:

⁴⁸ Dieser Abbrand liegt höher als der heute in Leistungsreaktoren für MOX Brennstoffe übliche, der zumeist eher bei etwa $30\text{--}40 \text{ MWd/kg (SM)}$ liegt. Die Tendenz geht aber zu höheren Abbränden von 50 MWd/kg (SM) und mehr, und es ist vorteilhaft für das Ziel einer möglichst weitgehenden Plutoniumeliminierung und eines für Waffenanwendungen schlechten Isotopenvektors des verbleibenden Plutoniums, möglichst hohe Abbrände zu erreichen.

Abbildung 5: Erreichbarer Abbrand in Abhängigkeit von der anfänglichen Plutoniumkonzentration in MOX-Brennstoffen (links) bzw. IMF-Brennstoffen (rechts) bei Einsatz von Reaktor-Plutonium



Es sind jeweils diejenigen Plutoniumkonzentrationen markiert, mit denen ein Zielabbrand von 450 kWd/cm³ (entsprechend 50 MWd/kg(SM) bei MOX) erreichbar ist [Pistner et al. 2006].

Tabelle 7: Zusammenfassung der Referenzbrennstoffe

Referenzbrennstoff	Plutoniumgehalt (Anreicherung mit BP)	Mittlere Reaktivität (Beginn eines Zyklus)	Mittlere Bor-Wirksamkeit bei Beginn eines Zyklus [pcm/ppm]	Zur Reaktivitätskontrolle, notwendige Bor-Konzentration [ppm]
RPu-MOX	4,9% entspr. 0,62 g/cm ³	0,081	-3,0	1700
RPu-IMF	0,64 g/cm ³	0,181	-4,2	3600
RPu-IMF-Erbium	0,70 g/cm ³ (Erbium: 0,2 g/cm ³)	0,099	-3,7	1900
WPu-MOX	4,0% entspr. 0,38 g/cm ³	0,102	-4,0	1800
WPu-IMF	0,53 g/cm ³	0,236	-4,6	4500
WPu-IMF-Erbium	0,62 g/cm ³ (Erbium: 0,4 g/cm ³)	0,089	-3,7	1600

Zusammenfassung der Referenzbrennstoffe, mit denen ein Gesamtabbrand von 450 kWd/cm³ (entsprechend 50 MWd/kg(SM) bei MOX) über vier Zyklen erreicht werden kann. Angegeben ist die anfängliche Plutoniumkonzentration der jeweiligen Brennstoffe (und ggf. die Zugabe des brennbaren Neutronengifts (BP) Erbium). Weiterhin angegeben ist die mittlere Reaktivität eines Reaktorkerns zu Beginn eines Zyklus. Diese muss durch die Zugabe von Bor zum Kühlmittel kompensiert werden können. Aus der mittleren Bor-Wirksamkeit bei Beginn eines Zyklus ergibt sich die zur Kompensation der anfänglichen Überschussreaktivität benötigte Bor-Konzentration.

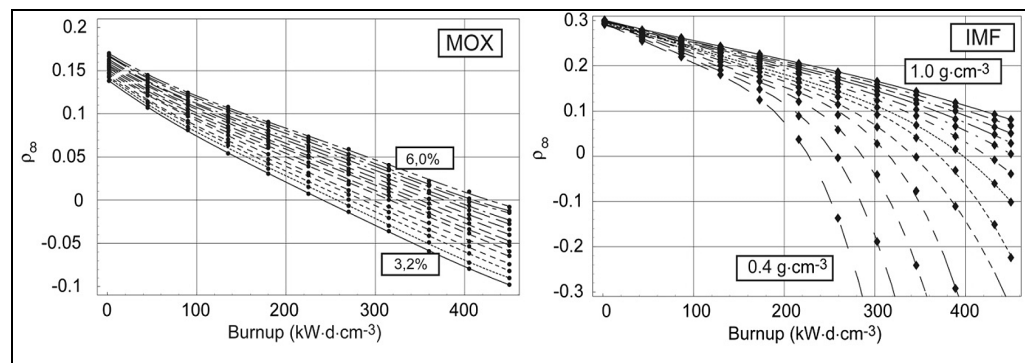
Damit werden sogenannte Referenzbrennstoffe definiert jeweils für MOX und IMF mit RPu und WPu. Für diese Referenzbrennstoffe kann dann der mit diesen Brennstoffen erreichbare Plutoniumumsatz bestimmt bzw. die verbleibende Plutoniummenge sowie deren Qualität verglichen werden. Im Folgenden werden Ergebnisse für Brennstoffe mit dem maximalen Zielabbrand von 450 kWd/cm³ (entsprechend 50 MWd/kg(SM)) vorgestellt (siehe Tabelle 7).

Die mit IMF erreichbare Plutoniumreduktion ist im Vergleich zu MOX-Brennstoffen sehr hoch. Während bei den untersuchten MOX-Brennstoffen die Plutoniummenge bei RPu um etwa 30% und bei WPu um 35% reduziert werden kann, ergibt sich bei IMF eine Reduktion von 77% bzw. 89%. Zusätzlich zum deutlich stärkeren Abbau des Plutoniums und den entsprechend geringeren verbleibenden Plutoniumkonzentrationen im abgebrannten

Brennstoff verändert sich auch die Isotopenzusammensetzung des Plutoniums sehr stark. Ausgehend von einer typischen RPu-Zusammensetzung (vgl. Info 4) ergibt sich beim MOX-Referenzbrennstoff für das verbleibende Plutonium eine um einen Faktor 1,3 erhöhte Wärmerate und eine um einen Faktor 1,53 erhöhte Neutronenrate. Für Brennstoffe auf der Basis von WPu entspricht beim MOX-Referenzbrennstoff das verbleibende Plutonium in seiner Zusammensetzung etwa derjenigen von RPu. Demgegenüber ist beim IMF-Referenzbrennstoff die Wärmerate um einen Faktor 2,19, der Neutronenhintergrund sogar um einen Faktor 3,42 gegenüber typischem RPu erhöht. Auch beim IMF-Brennstoff mit WPu ist die Qualität des am Ende des Abbrands verbleibenden Plutoniums deutlich schlechter als diejenige von RPu.

Neben den Veränderungen im Plutoniumgehalt zeigt sich für diese Referenzbrennstoffe als ein wesentlicher Unterschied zwischen IMF und MOX-Brennstoff der deutlich höhere Reaktivitätsverlust im Verlaufe des Abbrands, der wiederum eine deutlich höhere mittlere Anfangsreaktivität der IMF bei gleichem angestrebtem Zielabbrand erforderlich macht (vgl. Abbildung 6).

Abbildung 6: Abbrandabhängiger Verlauf der Reaktivität ρ für MOX und IMF-Brennstoffe



Es wird deutlich, dass die IMF-Brennstoffe eine deutlich höhere Anfangsreaktivität und einen stärkeren Reaktivitätsverlust im Verlaufe des Abbrands aufweisen. [Pistner et al. 2006].

Daraus leitet sich die Frage nach der Reaktivitätskontrolle bei IMF ab, die in Druckwasserreaktoren durch eine anfängliche Borkonzentration im Moderator (Wasser) gewährleistet werden kann. Es zeigt sich, dass gegenüber den Werten von 1100–1200 ppm bei konventionellen Uran-Brennstoffen bereits bei MOX-Brennstoffen ein mit 1500–1800 ppm leicht erhöhter Bor-Bedarf notwendig ist. Für IMF ergeben sich jedoch mit einem Bor-Bedarf von 3500–4500 ppm extrem hohe Werte, die in existierenden LWR nicht mehr realisierbar sind (siehe Tabelle 7).⁴⁹ Damit erweist sich der Einsatz von brennbaren Neutronengiften als unerlässlich, um den Reaktivitätsverlauf während des Abbrands so zu beeinflussen, dass eine Reaktivitätskontrolle beim IMF-Einsatz in existierenden Leichtwasserreaktoren möglich und gleichzeitig eine möglichst lange Bestrahlungsdauer erreicht wird. Nur so kann die Beseitigung von Plutonium optimiert werden.

⁴⁹ Borkonzentrationen von etwa 2000 ppm sind in heutigen LWR realistisch.

IMF mit brennbaren Neutronengiften

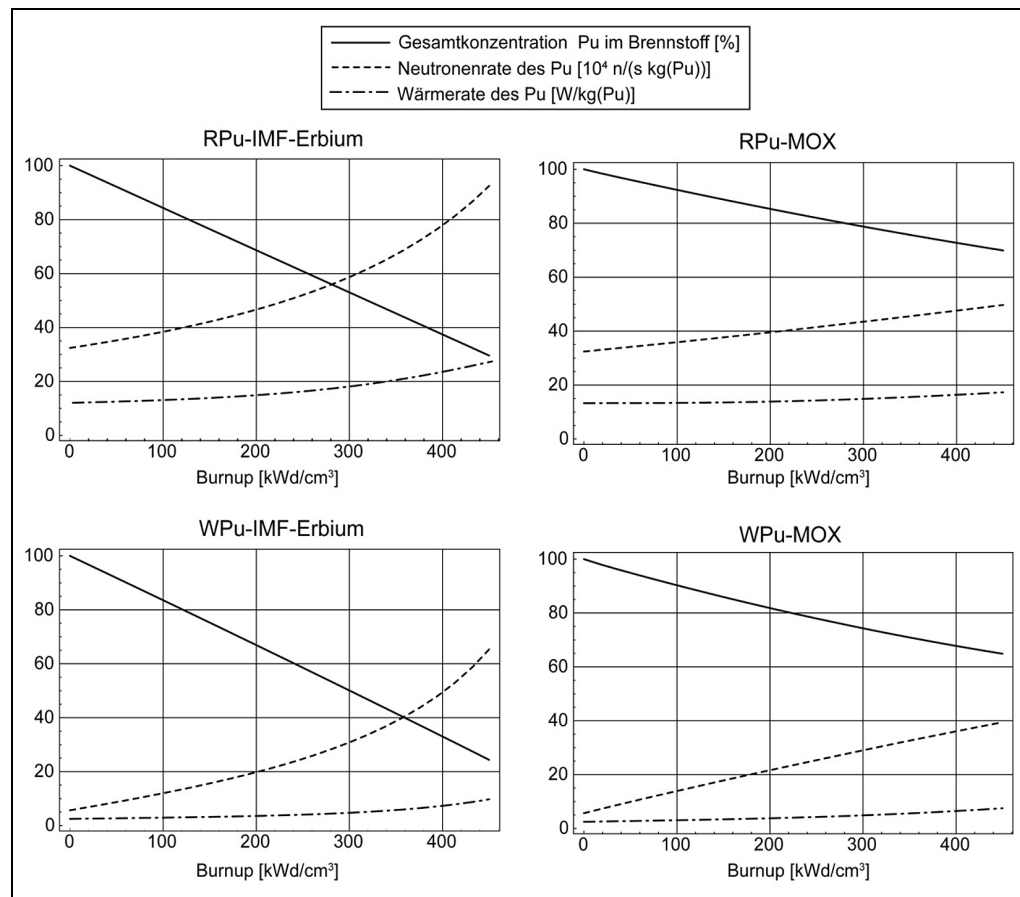
Um die anfänglich hohe Reaktivität bei den betrachteten IMF abzusenken, diese jedoch im Verlaufe des weiteren Abbrands wieder freizusetzen, können so genannte brennbare Neutronengifte (*burnable poisons*, BP) eingesetzt werden. Dies sind Elemente bzw. Isotope, die einen hohen Neutroneneinfangsquerschnitt aufweisen und dadurch zu Beginn des Abbrands die Reaktivität absenken. Gleichzeitig werden sie durch die Neutroneneinfänge in andere Isotope umgewandelt, die geringere Wirkungsquerschnitte aufweisen und somit die Reaktivität der Brennstoffe nicht mehr länger beeinflussen. Entscheidend für das Gelingen einer IMF-Option für die Plutoniumbeseitigung ist also die Frage, welche brennbaren Neutronengifte für den Reaktoreinsatz geeignet sind (vgl. [Pistner 2006, Pistner et al. 2006]).

Es werden Bor, Europium, Gadolinium und Erbium als mögliche BP untersucht. Für jedes dieser BP werden ein oder mehrere geeignete Anfangskonzentrationen bestimmt und es werden damit Abbrandrechnungen für IMF mit RPu und WPu durchgeführt. Dabei werden dieselben Plutoniumkonzentrationen untersucht wie bereits bei IMF ohne BP. Hinsichtlich der Möglichkeit einer Reaktivitätskontrolle werden wiederum für ausgewählte Zielabbrände geeignete Referenzbrennstoffe definiert. Als Kriterium hierfür wird die zur Reaktivitätskontrolle benötigte Bor-Konzentration bestimmt und solche Brennstoffe ausgewählt, bei denen diese auf weniger als 2000 ppm abgesenkt werden kann (vgl. Tabelle 7).

Anschließend werden die oben definierten Indikatoren zur Bewertung der Brennstoffe aus sicherheitstechnischer Sicht für alle Referenzbrennstoffe vergleichend analysiert. Bei den Reaktivitätskoeffizienten wird der Einfluss der BP auf die Borwirksamkeit, den Brennstoff-Temperaturkoeffizienten sowie den Moderatordichte-Koeffizienten betrachtet (vgl. ausführlicher [Pistner 2006, Pistner et al. 2006]). Als wesentliche Voraussetzung für einen sicheren Reaktorbetrieb müssen diese Reaktivitätskoeffizienten stets im negativen Bereich liegen. Unsere Untersuchungen zeigen, dass sich die Verwendung von Erbium als BP als günstig erweist, da es aufgrund ausgeprägter Resonanzen in den Wirkungsquerschnitten einen deutlichen negativen Beitrag zum Brennstoff-Temperaturkoeffizienten liefert. Beim Moderatordichte-Koeffizienten weisen die IMF zum Teil erheblich weniger negative Werte als MOX- oder Uran-Brennstoff auf, wobei sich für die IMF eine sehr starke Abbrand-abhängigkeit mit weniger negativen Werten des Moderatordichte-Koeffizienten zu Beginn des Abbrands zeigt. Auch hinsichtlich des Moderatordichte-Koeffizienten erweist sich Erbium als das am besten geeignete BP. Damit erhalten wir das Ergebnis, dass IMF mit Erbium als BP die attraktivste Brennstoff-Kombination darstellt.

Auf dieser Basis können zwei weitere, nunmehr realistisch einsetzbare IMF-Referenzbrennstoffe definiert werden, die eine passende Beimischung des BP Erbium enthalten, um den oben eingeführten Zielabbrand von 450 kWd/cm^3 zu erreichen. Diese sind ebenfalls in Tabelle 7 angegeben. Die dort zusammengefassten Angaben zu allen betrachteten Referenzbrennstoffen verdeutlichen insbesondere den Einfluss des brennbaren Neutronengifts Erbium auf die mittlere Anfangsreaktivität und den damit geringeren benötigten Bor-Gehalt im Kühlmittel. Gleichzeitig wird deutlich, dass zum Erreichen desselben Zielabbrands im Vergleich zu den Brennstoffen ohne Neutronengift eine etwas erhöhte anfängliche Plutoniumkonzentration notwendig ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Neutronengift bis zum Ende eines Zyklus nicht vollständig abgebaut wird.

Abbildung 7: Gesamtkonzentration des Plutoniums, Wärmerate sowie die Neutronenrate bezogen auf ein Kilo des jeweils enthaltenen Plutoniums in den Referenzbrennstoffen



Abbrandabhängige Veränderung wichtiger Eigenschaften in den vier Referenzbrennstoffen RPu-MOX (oben, rechts), RPu-IMF-Erbium (oben, links), WPU-MOX (unten, rechts) und WPU-IMF-Erbium (unten, links), [Pistner et al. 2006].

Vergleich realistisch einsetzbarer IMF mit MOX-Brennstoffen

Bei den realistisch einsetzbaren IMF mit Zusatz von Erbium als BP, die die technische Machbarkeit besser berücksichtigen, ist immer noch eine Reduktion des anfänglich enthaltenen Plutoniums um 70% (bei RPu-Brennstoffen) bzw. 76% (bei WPU-Brennstoffen) möglich (vgl. Abbildung 7). Die Isotopenzusammensetzung des Plutoniums verändert sich gegenüber dem ursprünglich eingesetzten WPU oder RPu durch den Reaktoreinsatz erheblich, wie Tabelle 8 zeigt. Dies hat Einfluss auf die kritische Masse, die Wärmerate und die Neutronenrate. Alle drei Faktoren sind wesentliche Kenngrößen für die Waffenverwendbarkeit. Beim RPu-Referenzbrennstoff für IMF mit Erbium ist die Wärmerate des verbleibenden Plutoniums gegenüber dem anfänglich eingebrachten um den Faktor 2,15, die Neutronenrate um den Faktor 2,85 erhöht. Auch beim entsprechenden WPU-IMF mit Erbium ist die Wärmerate des verbleibenden Plutoniums vergleichbar mit derjenigen von RPu, die Neutronenrate ist jedoch etwa doppelt so hoch wie bei RPu und liegt um einen Faktor 11,5 über derjenigen von WPU (vgl. Abbildung 7 und Tabelle 9). IMF schneidet im Vergleich mit den MOX-Brennstoffen demnach deutlich besser ab.

Werden diese Kenngrößen auf die (für eine Kernwaffe notwendige) kritische Masse bezogen, so werden die Vorteile von IMF gegenüber MOX-Brennstoffen noch deutlicher (vgl. Tabelle 9). Nach Einsatz von RPu liegt die Gesamtwärme- bzw. Gesamtneutronenrate um etwa einen Faktor 2,5 bzw. 2,7 höher; nach Einsatz von WPu liegt die Wärmerate um einen Faktor 1,6 höher und die Gesamtneutronenrate um einen Faktor 2,2.

Die hier zugrunde gelegte „bare critical mass“ ist ein guter Vergleichsmaßstab. Allerdings könnten bei fortgeschrittenem Kernwaffendesign um einen Faktor 3-4 geringere Plutoniummengen ausreichend sein. Auch dann zeigt sich zumindest, dass nach Einsatz von WPu in IMF die Gesamtwärmerate für eine realistisch kleine kritische Masse mit etwa 100 Watt etwas höher liegen würde als für typisches „Reaktor-Plutonium“. Bei Nutzung von Plutonium, das nach Einsatz von RPu in IMF verbleibt, müsste mit einer Gesamtwärmerate von bereits etwa 300 Watt für eine kritische Masse (unter günstigsten Bedingungen) gerechnet werden. Die Neutronenrate wäre fünfmal höher als bei typischem RPu (und etwa 35-mal höher als bei WPu). Aufgrund der hohen Neutronenrate des verwendeten Plutoniums wäre die Frühzündungswahrscheinlichkeit einer Kernwaffe jedenfalls drastisch erhöht. Plutonium solcher Art wäre im Vergleich zu Plutonium aus ausgebranntem MOX-Brennstoff weit unattraktiver für eine Verwendung in Kernwaffen.

Tabelle 8: Plutoniumisotopenvektor für die Referenzbrennstoffe nach Reaktoreinsatz

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
WPu (%)	0,05	93,60	6	0,3	0,05
RPu (%)	1,8	59	23	12,2	4
RPu-IMF-Erbium (%)	4,47	7,82	35,04	23,85	28,82
RPu-MOX (%)	2,5	38,7	29,7	19,1	10
WPu-IMF-Erbium (%)	1,0	17,2	39,3	26,6	15,9
WPu-MOX (%)	0,8	44	30,10	18,40	6,70
Eigenschaften der Isotope					
Wärmerate (W/kg)	560	1,9	6,8	4,2	0,1
Neutronenrate (n/s g)	2.600	0,022	910	0,049	1.700

Isotopenzusammensetzung (in Gewichtsprozent) des in den IMF- und MOX-Referenzbrennstoffen (vgl. Tab. 1 und 7) verbleibenden Plutoniums nach dem Reaktoreinsatz. Die Isotopenzusammensetzung von „Waffen-Plutonium“ (WPu) und „Reaktor-Plutonium“ (RPu) und die spezifischen Wärme- und Neutronenraten der Isotope sind zum Vergleich mit angegeben.

Tabelle 9: Wärme- und Neutronenrate des verbleibenden Plutoniums in den IMF- und MOX-Referenzbrennstoffen sowie in typischem WPu und RPu

	Wärmerate (W/kg)	Neutronenrate (n/s•g)	Kritische Masse (kg)	Gesamtwärmerate (W/Krit. Masse)	Gesamtneu- tronenrate (n/s Krit. Masse)
WPu	2,5	57	14,5	36	830.000
RPu	13,3	324	18,6	247	6.000.000
RPu-IMF- Erbium	28,6	925	32,3	924	30.000.000
RPu-MOX	17,6	505	21,3	374	11.000.000
WPu-IMF- Erbium	9,7	654	27,5	268	18.000.000
WPu-MOX	8,1	409	20,4	166	8.300.000

Zum einen wird die Wärme- bzw. Neutronenrate auf ein Kilogramm bzw. ein Gramm Plutonium bezogen (2. und 3. Spalte). Zum anderen werden diese Raten auf die errechnete kritische Masse bezogen (5. und 6. Spalte). Die kritischen Massen wurden unter Annahme von Plutonium in der stabilen Delta-Phase mit einer Dichte von $16,9 \text{ g/cm}^3$ berechnet, ohne dass zusätzliche Maßnahmen wie erhöhte Kompressionsgeschwindigkeit oder Neutronenreflektoren mit berücksichtigt wurden („bare critical mass“).⁵⁰

⁵⁰ Die Autoren danken Moritz Kütt für die Zusammenstellung und Berechnung der Daten in den Tabellen 8 und 9.

B. Berechnung der Produktion von Plutonium, Uran-233 und Tritium in Spallationsneutronenquellen

1. Vereinfachende Annahmen

Sämtliche Berechnungen der Plutoniumproduktion wurden mit MCNPX durchgeführt. Folgende vereinfachenden Annahmen lagen hierbei allen Berechnungen zugrunde [Englert et al. 2006]:

- Die Energiedeponierung limitiert die mit einer bestimmten Geometrie verwendbare Leistung des Beschleunigerstrahls und damit die maximal erreichbare Produktionsrate. Die Verwendung eines kompakten Uranzylinders ist daher aus Gründen der Energiedeponierung in der Realität nicht möglich, das Metall würde sich so stark erhitzen, dass es ohne Kühlung schmelzen würde. Realistische Targets müssen daher aufwändig gekühlt werden, um die erheblichen Wärmemengen, die durch den Beschuss entstehen, abführen zu können. Festkörpertargets aus Schwermetall werden daher i.d.R. als wasserdurchströmte Rohrbündel oder Platten ausgelegt. In leistungsstarken Spallationsanlagen werden Flüssigmetalltargets (Hg, Pb) eingesetzt, um die entstehende Wärme abzuführen. Festkörpertargets in Forschungsneutronenquellen können üblicherweise nur unterhalb von 2 MW betrieben, da die Targets hier klein sind, um hohe Neutronenleckagen zu ermöglichen. Die Leistungsdichte im Target ist daher sehr hoch, generell können jedoch Leistungsdichten bis zu 4 kW/cm^3 mit herkömmlichen Kühltechniken erreicht werden [Bauer 2004]. Bei noch höheren Leistungsdichten kann z.B. durch Strahlaufweitung und Änderungen des Strahlprofils die Energie besser auf das Targetvolumen verteilt werden. Ebenfalls sind Strahlteiler und mehrere Targets sowie rotierende Targets einsetzbar, um ggf. Probleme bei der Energiedeponierung zu lösen. Da Urantargets schlechte Bestrahlungseigenschaften aufweisen, können komplexere Targetgeometrien (*split-target*, z.B. Tantalscheiben umgeben von Uran) verwendet werden. [Russell et al. 1995].
- Des Weiteren wurde der Abbrand, d.h. die Veränderung der Nuklidzusammensetzung des Targetmaterials und damit einhergehende Veränderungen im Neutronenfluss, in allen Rechnungen vernachlässigt. Dies entspricht auch der Annahme einer kontinuierlichen Extraktion des entstandenen Plutoniums aus dem Zylindertarget. Da der Isotopenvektor jedoch zur Beurteilung der Proliferationspotentials relevant ist (siehe Info 4), wurde beispielhaft eine Abbrandrechnung durchgeführt (Zylinder $R=60\text{cm}$, $L=60\text{cm}$, 1 GeV). Für diese Abbrandrechnung wurde MCMATH verwendet (siehe Abschnitt 2), das im Rahmen des zweiten Teilprojekts entwickelt worden ist. Die Resultate zeigen, dass nach 500 Tagen Abbrand äußerst waffenreines Plutonium ($>99\%$ Pu-239) vorliegt. Die gesamte Plutoniumproduktion im Target ist daher praktisch identisch mit der Produktion von Pu-239.
- Es wurde ein kontinuierlicher Strom des Beschleunigers angenommen. Die angegebenen Produktionsraten wurden für einen kontinuierlichen Betrieb der Spallationsanlage ohne Strahlunterbrechungen durch Wartung, Targetaustausch etc., die aber typischerweise auftreten, berechnet. Viele als Forschungsanlagen konzipierte SNQs haben hohe Wartungszeiten, da zur Installation von Experimenten bzw. Verbesserung der Anlage längere Auszeiten eingelegt werden. Die von existierenden Anlagen angegebenen Auslastungsfaktoren schwanken daher anlagenspezifisch stark zwischen 50% bis zu über 90% [Cho 1998]. Die im Weiteren angegebenen

Produktionsraten beziehen sich daher auf verfügbare Strahlzeit und berücksichtigen keine Ausfälle in der Strahlzeit bzw. durch Wartungsperioden. Um die tatsächlichen Produktionsraten pro Jahr zu erhalten, müssen die angegebenen Produktionsraten mit dem je anlagenspezifischen Auslastungsfaktor entsprechend nach unten korrigiert werden.

2. Maximale Plutoniumproduktion

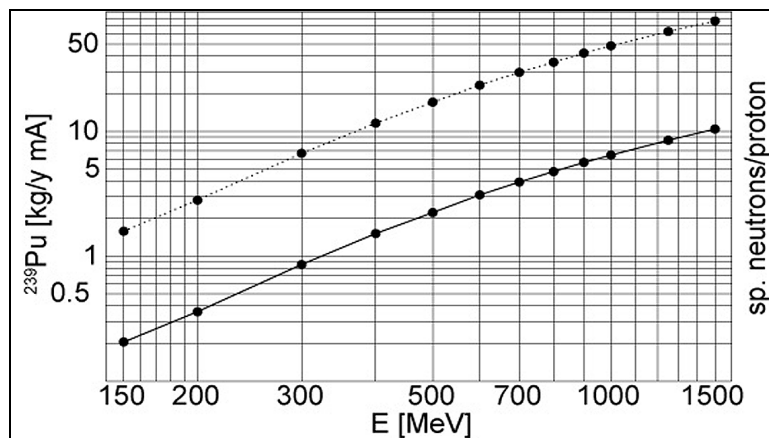
Um die maximale Pu-239-Produktion der direkten Bestrahlung von Uran zu berechnen, wurden MCNPX-Rechnungen einer Kugel aus natürlichem Uran mit 500 cm Radius mit einer isotropen Protonenquelle im Zentrum bei verschiedenen Protonenenergien durchgeführt. Eine solche Kugel weist keine Neutronenverluste durch die Oberfläche mehr auf und ist daher quasi-infini. Abbildung 8 zeigt die Produktion an Pu-239 pro Jahr verfügbare Strahlzeiten und pro Milliampere Beschleunigerstrom. Ebenfalls dargestellt ist die Anzahl der pro Proton entstehenden Spallationsneutronen. Es wird deutlich, dass schon bei relativ niedrigen Energien und moderaten Strömen Produktionsmengen im Kilogramm Bereich möglich sind. Bei progressiven Annahmen für den Beschleunigerstrom sind pro Jahr mehrere 10 Kilogramm Material produzierbar.

3. Abschätzung realistischer Targets mit Zylindergeometrie

Um realistischere Targets zu berechnen, wäre es eigentlich nötig, die komplette Geometrie eines Targets zu simulieren. Es lässt sich aber zeigen, dass der Fehler in der Produktionsrate durch die Computersimulation mit einfachen kompakten Zylindergeometrien (Länge L, Radius R) im Vergleich zu realen Targetkonstruktionen mit z.B. Kühlvorrichtungen nicht allzu groß ist [Englert 2004]. Anhand verschiedener Zylindergrößen lässt sich daher der Einfluss der Targetdimensionen (Materialmenge) auf die Produktion untersuchen. In diesem Fall wurde auch eine größere Anlage (1 GeV) angenommen. Abbildung 9 zeigt, dass die Produktionsraten bei etwa L=60 cm und R=60cm saturieren, die Neutronenverluste durch den Zylindermantel und die Grundfläche gegenüber dem Strahleintritt werden klein. Es ist bemerkenswert, dass bei einer Anlage mit 1 GeV schon eine kleine Menge Natururan von etwa 2t ausreicht, um eine Produktion von 2,2 kg pro Milliampere und Jahr verfügbare Strahlzeit zu erzielen.⁵¹

⁵¹ IAEA *Safeguards* werden erst ab einer Menge von 10 t Natururan angewendet.

Abbildung 8: Maximale Produktion von Plutonium-239 pro Jahr verfügbare Strahlzeiten und pro Milliampere Beschleunigerstrom sowie die Anzahl der pro Proton entstehenden Spallationsneutronen



Eigene MCNPX-Berechnung [Englert 2004, Englert et al. 2006] der Produktionsrate von Pu-239 in kg pro Jahr verfügbare Strahlzeit und Milliampere Strom in einer quasi-infiniten Kugel aus natürlichem Uran ($R = 500$ cm) mit einer isotropen Punktquelle im Zentrum in Abhängigkeit der Protonenenergie (durchgezogene Linie). Die gestrichelte Linie gibt die Anzahl der pro einfallendes Proton entstandenen Spallationsneutronen wieder.

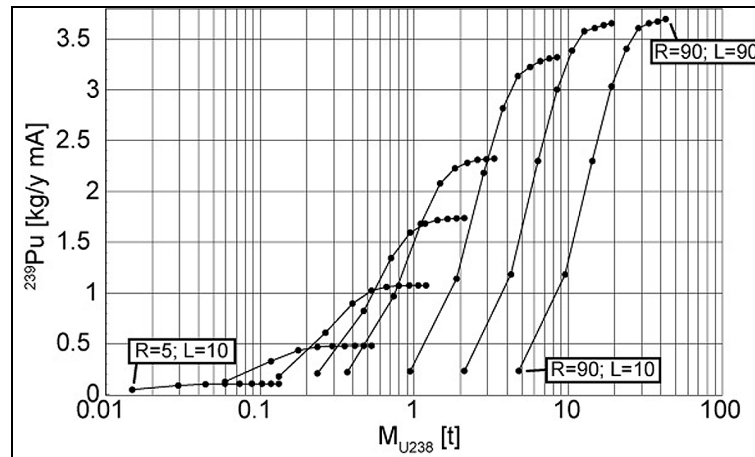
Im Vergleich mit dem Maximalszenario ist eine Reduktion der Produktion um den Faktor 1,8 zu verzeichnen, da Neutronenverluste durch die Grundfläche des Zylinders auftreten. Es ist jedoch möglich, die Produktion wieder zu optimieren und sich dem Maximalszenario wieder anzunähern, indem z.B. die Aufprallfläche in das Innere des Zylinders verlagert wird oder der Zylinder mit Reflektormaterial umgeben wird. Berechnungen dieses optimierten Szenarios zeigen, dass in Zylindern mit einer Bohrung von ca. 10 cm umgeben von einer 10 cm dicken Beryllium-Hülle einen Faktor 1,7 mehr Material produziert werden kann als in Abbildung 9 angegeben. Für kleine Zylinder kann in dieser Weise sogar ein Faktor 2 erreicht werden. Für kleine Zylinder würde auch die Benutzung eines Reflektormantels allein schon die Produktionsrate erheblich steigern.

Energie, Strom und Targetgeometrie bzw. die Dimensionierung des Targets bestimmen weitgehend die Produktionsrate. Für eine vorgegebene Produktionsrate von 500 g Pu-239 pro Jahr verfügbare Strahlzeit in einem Uranzylinder (Signifikanzschwelle) zeigt Abbildung 10 beispielhaft die benötigte Energie der Protonen in Abhängigkeit vom Strom des Beschleunigers. Je höher der Beschleunigungsstrom, desto weniger Protonenenergie ist nötig, um dieselbe Produktionsrate zu erreichen. Niedriger Strom und niedrige Energie können durch Vergrößerung des Targets (und damit durch Minimierung von Neutronenverlusten durch die Oberflächen) kompensiert werden.

Schon bei moderaten Strömen von 1-2 mA (derzeitiger Stand der Technologie) reicht eine Protonenenergie von 300-400 MeV bei einem Uranzylinder mittlerer Größe mit einer Masse von 2,2 t aus, um eine angenommene Signifikanzschwelle von 0,5 kg Pu-239 pro Jahr verfügbare Strahlzeit zu überschreiten.

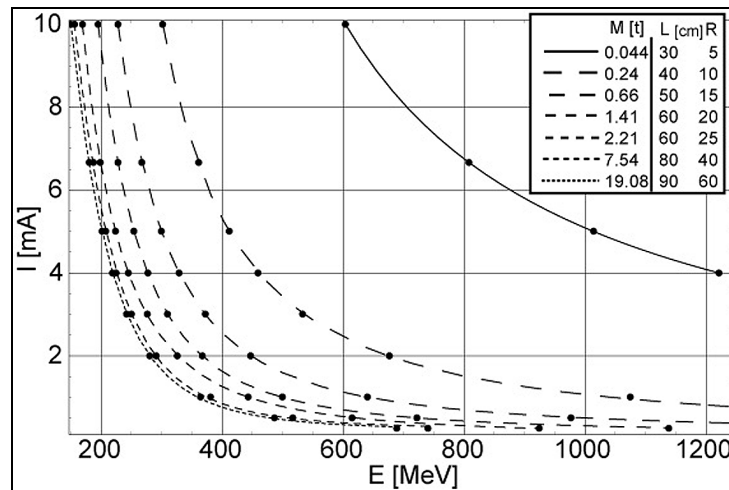
Zieht man in Betracht, dass die Ströme von Beschleunigern in den nächsten 10-20 Jahren auf 10 mA (oder gar auf bis zu einige 10 mA) steigen könnten (progressive Annahme) ist schon mit sehr kleinen Beschleunigeranlagen und geringen Mengen an natürlichem Uran als Ausgangsmaterial eine signifikante Plutoniumproduktion erreichbar.

Abbildung 9: Berechnung der Produktionsrate von Pu-239 (in Kilogramm) pro Jahr verfügbare Strahlzeit und Milliampere Strom für verschiedene Uranzylinder.



Eigene MCNPX Berechnung [Englert et al. 2006] der Produktionsrate von Pu-239 (in kg) pro Jahr verfügbare Strahlzeit und Milliampere Strom für verschiedene Zylinder aus nat. Uran ($R=5,10,15,20,25,40,60,90$ cm; $L=10,20,30,40,50,60,70,80,90$ cm) bestrahlt mit 1 GeV Protonen auf die Grundfläche (durchgezogene Linien verbinden konstante Radien).

Abbildung 10: Benötigte Protonenenergie und Beschleunigungsströme für eine signifikante Plutoniumproduktionsrate.



Eigene MCNPX-Berechnung [Englert et al. 2006] der benötigten Strahlenergie und Strom des Beschleunigers zur Erzielung einer Produktionsrate von 0,5 kg Pu-239 pro Jahr verfügbare Strahlzeit (Signifikanzschwelle) für verschiedene Zylindergeometrien.

4. Zylindergeometrie in verschiedenen Szenarien

Anhand der Ergebnisse für die Zylindergeometrie können Abschätzungen für theoretisch mögliche Plutonium-Produktionsraten in heute existierende Forschungsanlagen gemacht werden, wobei die Verwendung von Urantargets vorausgesetzt wird. Realistische Festkörper-Targets müssen gekühlt werden. Es gibt zwei grundlegende Targettypen, das so genannte Rohrbündel-Design, bei dem Wasser an Rohren, die das für die Targets genutzte Schwermetall enthalten, entlangfließt, und das Plattendesign, bei dem mehrere hintereinander liegende Schwermetallscheiben jeweils durch eine Kühlmittelspalte getrennt sind.

Schätzt man das Volumen zweier realistischer Targets in der SINQ Spallationsquelle am Paul Scherrer Institut in der Schweiz (1,8 mA, 590 MeV, 17x17x50 cm Rohrbündelkonzept-Target) und in der ISIS-Quelle am *Rutherford Appleton Laboratory* in Großbritannien (0.2 mA, 800 MeV, 11x11x32 cm Plattenkonzept-Target) ab und vergleicht sie mit den in Abbildung 9 dargestellten Simulationsergebnissen, so ergibt sich eine mögliche Produktionsrate von 0,09-0,36⁵² kg Pu-239 pro Jahr verfügbarer Strahlzeit für SINQ und 0,02-0,06 kg/a Pu-239 für ISIS.⁵³ Eine Umnutzung einer ähnlichen Forschungsanlage entspräche dann dem Szenario 1.

Detaillierte Berechnungen eines MCNPX Modells für ein geplantes Konzept eines 500 kW *Beam-Dump* der bisher nicht gebauten ESS (*European Spallation Source*) ergeben eine Produktionsrate von 0,35 kg/a Pu-239. Die 0,35 kg/a liegen zwar unterhalb der angenommenen Signifikanzschwelle von 0,5 kg/a, aber eine Änderung der Geometrie zur Erhöhung der Produktionsrate ist ebenso denkbar, wie die Konstruktion eines *Beam-Dumps* für höhere Strahlleistungen. Eine *Beam-Dump*-Konstruktion aus Uran ist auch für die vollen⁵⁴ 5 MW einer Anlage wie die ESS denkbar und ergäbe eine Produktion von 3,53 kg/a Pu-239, sollten die Probleme der Wärmeabfuhr lösbar sein. Andere und besser angepasste Konzepte sind ebenfalls vorstellbar und machbar.

5. Vergleich Reaktor vs. Spallation

Ein Vorteil der Materialerbrütung von Kernwaffenmaterialien in Spallationsquellen ist der extrem gute Isotopenvektor, der erzielbar ist. So entstünde in Urantargets fast ausschließlich das Plutoniumisotop Pu-239. Ansonsten wäre eine solche Qualität in üblichen Reaktoren nur bei sehr kurzen Bestrahlungszeiten erreichbar, was zu aufwändigeren Produktionszyklen führen würde. Der Hauptvorteil einer Spallationsanlage gegenüber der Produktion von Plutonium im Reaktor ist die vergleichsweise geringere anfängliche Masse an Natururan, die benötigt wird. Eine mittelgroße Anlage mit einem Hochstrombeschleuniger, die speziell zur Produktion ausgelegt wurde (500 MeV, 10 mA, 80% Verfügbarkeit) produziert etwa 5,2 kg Pu pro Jahr mit einer Ausgangsmasse von 2,2 t Uran. Mit geeigneten Maßnahmen (Reflektor, Geometrie) kann die Produktion nochmals um einen Faktor 2 gegenüber einem einfachen Zylinder gesteigert werden. Eine solche Anlage produziert damit etwa soviel Plutonium, wie die kleinen 40 MW Plutoniumproduktionsreaktoren des französischen Waffenprogramms (G1, vgl. Tabelle 10) mit erheblich geringerem Materialbedarf an Natururan als Ausgangsmaterial.

Um vergleichbare Produktionsraten wie in einem größeren Reaktor eines historischen Waffenprogramms zu erzeugen (Calder Hall in Großbritannien; Hanford in den USA) sind große Beschleuniger mit großen Targets mit Leistungen zwischen 5-10 MW nötig (progressive Annahme für den Beschleunigerstrom). Spallationsanlagen, insbesondere große Megawattanlagen, sind jedoch im Vergleich zum Reaktor teurer. Ökonomischer lässt sich daher Plutonium nach wie vor in einem Reaktor erzeugen.

52 Die Spannweite ergibt sich durch eine Abschätzung des exakten Volumens und damit der enthaltenen Masse aus den äußeren Abmessungen der Targets. Der Maximalwert gibt die Produktionsrate für eine vollständige Füllung des Targets mit Uran an. Dies ist jedoch nicht der Fall aufgrund der Kühlspalte im Target. Die untere Grenze kann daher als eine Abschätzung für den maximalen Volumenanteil des Kühlmittels angesehen werden.

53 An dieser Stelle soll auch explizit zum Ausdruck gebracht werden, dass die Autoren in keiner Weise einen militärischen Gebrauch von bestehenden Forschungsanlagen wie der SINQ oder ISIS etc. vermuten, untersuchen oder befürchten. Die Beispiele dienen lediglich dazu, realistische Eckdaten für existierende Spallationsneutronenquellen im Forschungsbereich zu nutzen, um bestimmte mögliche Szenarien zu entwickeln.

54 Der ESS 500 kW *Beam-Dump* ist nur für den Testbetrieb geeignet. Für den Leistungsbetrieb wurde in der späteren ESS Planung kein *Beam-Dump* vorgesehen. Dennoch ist eine Vergrößerung des 500 kW *Beam-Dumps* denkbar, um die volle 5 MW Leistung aufnehmen zu können.

Die Produktionsrate, die durch die Nutzung eines kleinen Forschungsreaktors wie der nordkoreanische Reaktor in Yong-byon (Tabelle 10) erzielbar ist, ist allerdings schon vergleichbar zu erzielbaren Produktionsraten einer mittelgroßen SNQ mit relativ moderaten Strömen.

Zur Gewinnung des reinen Plutoniums muss dieses aus dem bestrahlten Spallationstarget bzw. aus dem bestrahlten Brennstab abgetrennt werden. Dies erfolgt für Reaktorbrennstoff in Wiederaufarbeitungsanlagen unter Verwendung des PUREX-Prozesses. Für die Abtrennung aus Spallationstargets sind einfachere Separationsverfahren als das aufwändigere PUREX ausreichend. Die geringere Targetmasse aus einer SNQ ist hier von nicht unerheblichem Vorteil. Zur Gewinnung von Waffen-Plutonium in einem Produktionsreaktor müssen in den Beispielen der Tabelle 10 je nach Verweildauer im Reaktor (Abbrand) etwa 6-25 Tonnen Uran umgesetzt werden um 4-5 kg Plutonium abzutrennen. Bei Spallationstargets liegen vergleichbare Konzentrationen für die einfachen Zylindergeometrien zwar erst für Anlagen ab ca. 1 MW vor. Für eine mittelgroße Hochstromanlage würde für die Produktion von 5 kg Plutonium jedoch auch schon 2t Natururan, das ein Jahr lang bestrahlt wurde, genügen.

In einem Reaktor ist darüberhinaus das Be- und Entladeschema von Bedeutung, da der Reaktor immer in der Nähe der Kritikalität gehalten werden muss. Die Verweildauer eines Brennelements ist dadurch typischerweise begrenzt. Ein Spallationstarget kann im Prinzip unbegrenzt bestrahlt werden. Längere Bestrahlungszeiten und damit die maximal erzielbaren Konzentrationen sind im Wesentlichen nur durch die Materialbeanspruchung des Targets begrenzt.

Tabelle 10: Kenndaten zur Plutoniumproduktion in Reaktoren

Reaktor	P [MWth]	Anr [%]	B [GWd/t]	init. U [t]	Jahre im Reakt	Konz. Br. [kg/tHM]	Pu fis [%]	Konv [g/MWd]	Verf [%]	Pu Rate [kg/y]
PWR komm.	3000	3,5	30,00	100	3,4	8,5	<80%	0,285	80	250
PWR Waffen	3000	3,5	1,00	100	0,15	Ca. 0,5	98	0,5	60	329
Frankreich G1	40	0,7	0,2	100	1,7	0,19	98,6	0,95	80	11,1
Calder Hall	180	0,7	0,4	112	0,83	0,36	96,9	0,925	82	50
Hanford-N	4000	>0,7	1,21	379	0,39	0,85	93	0,5	80	584
Yong-byon	Ca. 25	0,7	0,3	48	1,97	0,28	97,5	Ca.0,9	80	6,6

Tabelle 11: Kenndaten zur Plutoniumproduktion in Spallationsneutronenquellen

	Spallationsanl.	Str [mA]	P [MW]	Target [t]	Jahre in SNQ	Konz. T. [kg/tHM]	E [GeV]	Pu fis [%]	Konv [g/MWd]	Verf [%]	Pu Rate [kg/y]
Groß	Konservativ	0,1	0,1	19	1	0,015	1	99	9, 9	80	0,288
	Moderat	1	1	19	1	0,15	1	99	9, 9	80	2,88
	Progressiv	10	10	19	1	1,5	1	99	9, 9	80	28,8
Mittel	Konservativ	0,1	0,05	19	1	0,0042	0,5	99	5, 5	80	0,08
	Moderat	1	0,5	19	1	0,042	0,5	99	5, 5	80	0,8
	Progressiv	10	5	19	1	0,42	0,5	99	5, 5	80	8
Klein	Konservativ	0,1	0,015	19	1	0,00021	0,15	99	0,91	80	0,004
	Moderat	1	0,15	19	1	0,0021	0,15	99	0,91	80	0,04
	Progressiv	10	1,5	19	1	0,021	0,15	99	0,91	80	0,4
Mittel	Konservativ	0,1	0,05	2,2	1	0,024	0,5	99	11,9	80	0,052
	Moderat	1	0,5	2,2	1	0,24	0,5	99	11,9	80	0,52
	Progressiv	10	5	2,2	1	2,4	0,5	99	11,9	80	5,2

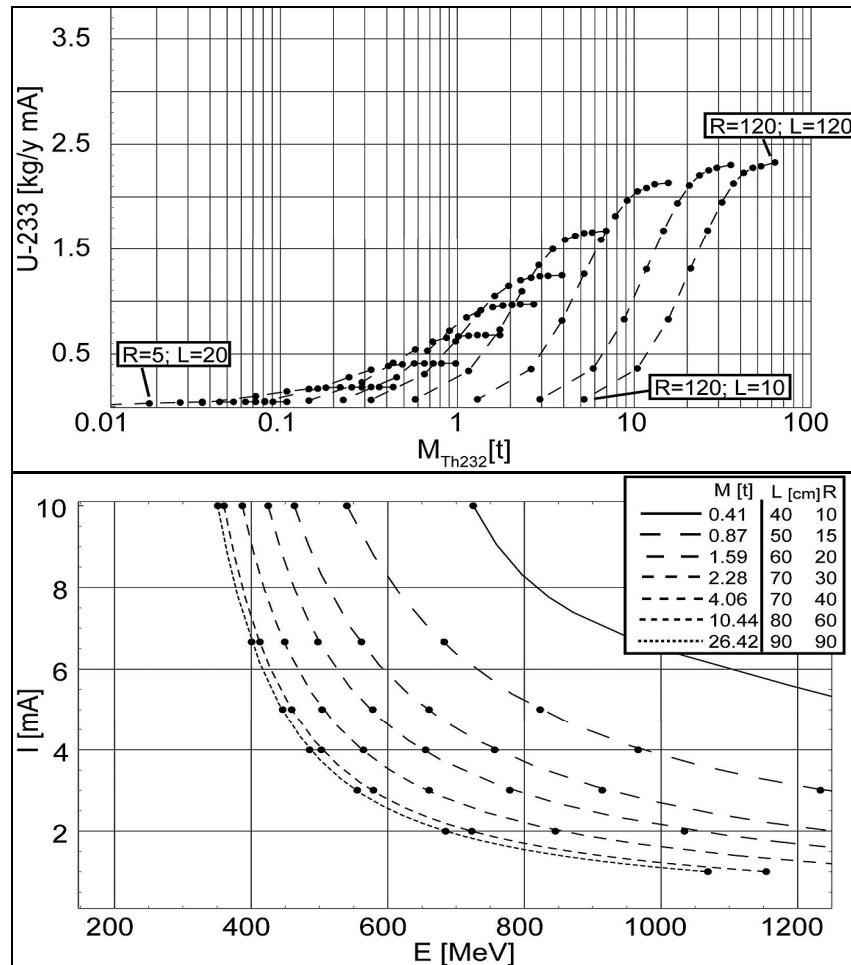
In Tabelle 10 und 11 werden wesentliche Parameter von Reaktoren zur Plutoniumproduktion und Spallationsquellen, die zur Plutoniumproduktion genutzt werden könnten, verglichen. P: Leistung der Anlage; Anr: Anreicherungsgrad des eingesetzten Urans; B: *Burnup*/Abbrand im Reaktor; init. U: Anfangsbeladung des Reaktors; Jahre im Reakt/in SNQ: Verweilzeit eines Brennelements im Reaktor/eines Spallationstargets in einer Spallationsquelle; Konz. Br.: Pu-Konzentration im abgebrannten Brennelement; Pu fis: Anteil an therm. spaltb. Pu-239 und Pu-241; Konv: Konversionsfaktor nach [Albright 1996, S. 461 ff] bezieht die Produktionsrate auf die therm. Leistung bei Reaktoren und Strahlleistung bei SNQ (unter der Einbeziehung des realen Abbrandes bei Reaktoren); Verf: Verfügbarkeit der Anlage pro Jahr; Pu Rate: Produktionsrate für Plutonium; Str: Beschleunigerstrom; Target: Uranmenge im Spallationstarget; Konz. T.: Pu-Konzentration im bestrahlten Target; E: Protonenenergie. Angaben und Berechnungen der Produktionsraten in Tabelle 10 nach [Albright 1996], Angaben zum nordkoreanischen Reaktor in Yong-byon nach [Albright 1994]. Ansonsten: eigene Berechnungen.

6. Produktion von Uran-233

Bisher wurden nur die möglichen Produktionsraten für Plutonium angegeben. Die entsprechenden Produktionsraten für die Produktion des Isotops U-233 aus Thorium-232 sind in Abbildung 11 wiedergegeben. Die Kurven für die Produktionsraten in Zylindern weisen ein ähnliches Sättigungsverhalten auf wie die entsprechende Produktionsraten für Plutonium (s. Anhang B.3). Die Produktionsraten für U-233 in Thorium liegen jedoch deutlich unter den Produktionsraten für Pu-239 aus U-238. Der Vergleich der Berechnungen von Zylindergeometrien (Abbildung 9 und Abbildung 11) ergibt, dass aus einer eingesetzten Masse von 30t U-238 mit einem 1 GeV Protonenstrahl 3,7 kg Pu pro Jahr verfügbare Strahlzeit und Milliampere produziert werden kann, wohingegen mit 30t Th-232 nur eine Produktion von 2,3 kg/(a mA) U-233 möglich ist. Für kleinere Massen wird das Verhältnis noch ungünstiger, mit ca. 2t Uran lässt sich immerhin 2,3 kg/(a mA) Pu-239 produzieren mit derselben Masse Thorium nur 1,2 kg/(a mA) U-233.

Für dieselbe Produktionsrate ist daher mit Thorium entweder mehr Ausgangsmaterial notwendig oder höhere Ströme oder Energien des Beschleunigers. So ist hier erst mit Strömen zwischen 3-4 mA und mittleren Anlagengrößen ab 500 MeV eine Produktion von 500 g U-233 pro Jahr verfügbare Strahlzeit in einer SNQ zu erzielen.⁵⁵

Abbildung 11: Berechnungen der Produktionsrate von U-233 in kg pro Jahr verfügbare Strahlzeit und Milliampere Strom für verschiedenen Zylinder.



Oben: Eigene-MCNPX Berechnung der Produktionsrate von U-233 in kg pro Jahr verfügbare Strahlzeit und Milliampere Strom für verschiedenen Zylinder aus Thorium (R=5,10,15,20,25,40,60,90,120 cm; L=10,-20,30,40,50,60,70,80,90 cm) bestrahlt mit 1 GeV Protonen auf die Grundfläche (durchgezogene Linien verbinden konstante Radien). Unten: Eigene MCNPX-Berechnung der benötigten Strahlenergie und Strom des Beschleunigers zur Erzielung einer Produktionsrate von 0,5 kg U-233 pro Jahr verfügbare Strahlzeit für verschiedene Zylindergeometrien.

⁵⁵ IAEA Safeguards werden auf Thorium ab einer Masse von 20t angewendet.

7. Tritium

Mit einer Spallationsneutronenquelle ist auch die Produktion von Tritium möglich. Das *Accelerator Production of Tritium* (APT) Projekt in der USA etwa hatte zum Ziel, die Tritiumversorgung für das strategische Kernwaffenarsenal basierend auf den START II Vertrag (3,000-3,500 Sprengköpfe) abzusichern. Hierfür ist eine jährliche Produktionskapazität von etwa 1,5 kg Tritium pro Jahr notwendig (CRS 2001). Die Spallationsanlage zur Produktion des Tritiums sollte bei einer Energie von 1 GeV und mit einem Strom von 100 mA arbeiten. Es wurden umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Unter anderem wurde der *Low Energy Demonstration Accelerator* (LEDA) gebaut, um die Erzeugung von kontinuierlichen Strömen mit mehr als 100 mA zu testen. 1998 wurde jedoch entschieden, Tritium für Kernwaffen weiterhin in Reaktoren zu produzieren und das APT Projekt lief in den folgenden Jahren langsam aus.

Zur Berechnung der Tritiumproduktionsmöglichkeit mit einer SNQ wurde für unsere Untersuchung ein einfaches Modell erstellt. Das Modell besteht aus einem kugelförmigen Mehrschalenmodell, mit alternierenden Schichten aus Blei zur Erzeugung der Neutronen durch Spallation und aus Blanketschichten gefüllt mit unter Druck stehendem Helium-3 aus dem unter Neutronenbestrahlung Tritium entsteht.⁵⁶ Die Protonen starten in einer isotropen Punktquelle im Zentrum der Schalen. Die Berechnungen mit diesem stark vereinfachten Modell ergaben eine Produktionsrate von ca. 2-5 g Tritium pro Jahr und Milliampere Strom (bei einer Protonenenergie von 500 MeV - 1 GeV). In realistischen Anlagen werden die Neutronen geeignet moderiert, so dass sich die Produktionsrate nochmals steigern ließe. Aus diesem Modell und den Angaben aus dem APT-Projekt ergibt sich daher eine Tritiumproduktion mit einer Spallationsquelle von etwa 5-15 g Tritium pro Jahr und Milliampere Strom bei einer Energie von 1 GeV, je nach Moderation. Diese Menge ist ausreichend für etwa 2-7 geboostete Kernwaffen.⁵⁷

Allerdings ist aufgrund der komplexen Targetgeometrie, der notwendigen Gasströme und Separationsanlagen eine verdeckte Produktion in einer Forschungsanlage wohl nur schwer zu tarnen. Proliferationsrelevanter sind hier wiederum Szenarien mit einer speziell für die Tritium-Produktion hergestellten Anlage.

⁵⁶ Ein alternativer Produktionspfad, der ebenfalls im APT Projekt in Erwägung gezogen wurde, ist die Reaktion von Neutronen mit Lithium-6.

⁵⁷ Mit der angestrebten Anlage des ATP-Projekts hätte dementsprechend das Produktionspotential ausgereicht, um für den Ersatz des Tritium im US-Waffenarsenal, das durch radioaktiven Zerfall verschwindet, unter den Bedingungen des START II Vertrages zu sorgen.

C. Spallationsanlagen weltweit und Diskussion von *Safeguards*

1. Bestehende Spallationsneutronenquellen

In Tabelle 12 werden einige wesentliche Angaben für bestehende Spallationsneutronenquellen gemacht (Protonenenergie, Beschleunigungsstrom, Leistung, Betriebsstatus und – soweit bekannt – Betriebsbeginn).

Tabelle 12: Bestehende Spallationsquellen

Land	Beschleunigertyp	Name	Energie [MeV]	Strom [mA]	Leistung [kW]	Status	Start des Betriebs
USA		ZING-P	300	0,00033	0.1	shut down	
		ZING-P'	500	0,006	3	shut down	
	Synchrotron	IPNS ANL	450	0,015	7	op.	1980
	LINAC	MLNSCR-LANSCE LANL	800	0,135	108	op.	
	LINAC	WNR-LANSCE LANL	800	0,005	4	op.	
	LINAC	SNS ORNL	1000	1,0	1000	op.	2006
Kanada	Cyclotron	ISAC TRIUMF	500	0,1	50	op.	1974
Schweiz	Cyclotron	SINQ PSI	590	1,8	1062	op.	1996
England	Synchrotron	ISIS RAL	800	0,2	160	op.	1985
Russland	LINAC	MMF-INR, RAS	209	0,15	31	partly op	
Japan	Synchrotron	KENS	500	0,01	5	op.	1980

2. Weitere Beschleunigerprojekte

Tabelle 13 ist eine Liste ausgewählter neuerer und älterer Design-Studien, Projekten und in Bau befindlichen Spallationsquellen (SNQ), Beschleunigern (einige auch in Betrieb) und beschleunigergetriebenen Systemen (ADS). In dieser Liste fehlen viele Projekte und neue Planungen für hochintensive Protonenbeschleuniger (Neutrinos, ATW etc.). Die Liste gibt aber eine Bandbreite an Beschleunigerentwicklungen und deren genutzte Parameter vor.

Neutronenflüsse von gepulsten Hochleistungs-SNQ liegen für ihre Spitzenflüsse (10^{16} - 10^{17} n/cm²s) heute bereits deutlich über den Werten für kontinuierlich betriebene Hochflussreaktoren (10^{14} - 10^{15} n/cm²s) [Bauer 2001]. Die zeitlich gemittelten Flüsse von Hochleistungs-SNQ können bereits fast diejenigen von guten Forschungsreaktoren erreichen. Zunehmend werden in den Forschungsanwendungen gepulst betriebene Forschungsneutronenquellen wegen ihrer hohen Spitzenflüsse relevant. SNQ haben dann für diese Anwendungen durch die Möglichkeit eines gepulsten Betriebs einen Vorteil.

3. Diskussion von *Safeguards* in Hinblick auf mögliche Aktivitäten zu Spallationsanlagen

Zunächst hat jeder Mitgliedsstaat des Nichtverbreitungsvertrags (NVV) ein Abkommen zu „*Comprehensive Safeguards*“ nach Information Circular 153 [IAEO-INFCIRC 153] mit der IAEO abzuschließen. *Safeguards* auf alle Materialien, die Uran oder Thorium enthalten, beginnen, wenn diese exportiert oder importiert werden, es sei denn es wurde für nicht-

nukleare Zwecke („*non-nuclear purposes*“) im- oder exportiert. *Safeguards* werden ohne Ausnahme auf alle Materialien, die Uran oder Thorium enthalten, auch innerhalb eines Landes erhoben, wenn das Material eine Zusammensetzung oder einen Reinheitsgrad besitzt, um es zu Brennstoff zu verarbeiten oder anzureichern und wenn es die Anlage verlässt, in der es produziert wurde bzw. wenn solches Material importiert wurde.

Des Weiteren kann Material, das Uran und Thorium enthält, von der IAEA auf Nachfrage des betreffenden Staates von *Safeguards* freigestellt werden. Darunter fällt eine Menge von 10t Natururan (<1% Anreicherung) oder 20t abgereichertes Uran (>0,5% Anreicherung), bzw. 20t Thorium. Derzeitig fallen daher Spallationsneutronenquellen nicht notwendig unter *Safeguards*maßnahmen, solange nicht mehr als 10t Natururan oder 20t abgereichertes Uran eingesetzt werden, wobei jedoch bereits kleinere Uranmengen für eine signifikante Produktion genügen können.

Außerdem soll die IAEA von Staaten über ihre „Anlagen“ („*facilities*“) unterrichtet werden. Der Begriff „*facilities*“ ist wohldefiniert⁵⁸ und umfasst Reaktoren, kritische Anlagen, Konversionsanlagen, Brennstoffherstellungsanlagen, Wiederaufarbeitungsanlagen, Anlagen zur Isotopentrennung und Anlagen zur Aufbewahrung oder Anlagen an denen mehr als 1 effektives Kilogramm⁵⁹ „regelmäßig genutzt“ wird („*is customarily used*“) [IAEO-INFCIRC 153]. Spallationsanlagen kommen hier allerdings nicht explizit vor. Zwar könnten Spallationsanlagen, in denen mehr als 1 kg Plutonium erbrütet und dann damit hantiert wird, wiederum unter den Begriff „*facility*“ fallen. Dennoch müsste auch das Augenmerk der IAEA auf Spallationsanlagen liegen, um eine fehlende Deklaration für eine Spallationsanlage zu entdecken. Derzeit ist dies jedoch kaum der Fall.

Ein Lösungsvorschlag wäre es, hier die Definition von „*facility*“ der IAEA (z.B. den Begriff Reaktor) auf alle neutronenproduzierenden Prozesse auszuweiten, die ausreichend Neutronenflüsse bereitstellen, eine signifikante Menge an Plutonium oder anderen kernwaffenrelevanten Stoffen (wie Uran-233 oder Tritium) zu erbrüten. Hierunter würden dann auch z.B. Fusionsreaktoren fallen.

In den alten anlagenspezifischen *Safeguards* nach [IAEO-INFCIRC 66]⁶⁰ wurde als Reaktor ein Gerät definiert,⁶¹ in dem eine kontrollierte selbstablaufende Kettenreaktion aufrecht erhalten werden kann. Diese ursprüngliche Definition fand dann Eingang in das IAEA *Safeguards Glossary* [IAEO 2001], in dem ein Reaktor als Apparat definiert ist,⁶² der keine Atomwaffe ist und so gestaltet ist, dass er eine Kernspaltung in einer selbsterhaltenden Kettenreaktion aufrecht erhält. In INFCIRC/66 wurden auch Anlagen von *Safeguards* ausgenommen in denen weniger als 100 g Pu pro Jahr produziert wurde oder die eine Leistung kleiner als 3 MWth aufweisen. Diese alten Definitionen für anlagenspezifische *Safeguards* könnten genutzt werden, um letztlich den Begriff Reaktor umzudefinieren.

58 "Facility" means: a) A reactor, a critical facility, a conversion plant, a fabrication plant, a reprocessing plant, an isotope separation plant or a separate storage installation; or b) Any location where nuclear material in amounts greater than one effective kilogram is customarily used." [IAEO-INFCIRC 153]

59 Effektives Kilogramm: für Plutonium 1 kg; für Uran mit einer Anreicherung >1% wird das Gewicht des Materials mit dem Quadrat seines Anreicherungsgrades multipliziert (z.B. 25 kg 20% LEU sind 1 effektives Kilogramm); für Uran mit einer Anreicherung zwischen 0,5 und 1% bzw. für abgereichertes Uran (<0,5%) entsprechen einem effektiven Kilogramm 10 t bzw. 20 t.

60 Anlagenspezifische *Safeguards* nach INFCIRC/66 wurden von den *Comprehensive Safeguards* nach INFCIRC/153 abgelöst und existieren nur noch bei wenigen Anlagen in Israel, Pakistan und Indien.

61 "Reactor" means any device in which a controlled, self-sustaining fission chain-reaction can be maintained.

62 *Nuclear reactor* means an apparatus, other than an atomic weapon, designed or used to sustain nuclear fission in a self-supporting chain reaction [IAEO 2001].

Ein Vorschlag könnte so lauten:⁶³

„Reaktor heißt jedes Gerät in dem eine kontrollierte selbsterhaltende Spalt-Kettenreaktion aufrecht erhalten werden kann oder alle subkritischen Anlagen, in denen eine kontrollierte Spalt-Kettenreaktion mit Hilfe einer äußerlichen Neutronenquelle aufrechterhalten wird, oder Anlagen, in denen mit sonstigen physikalischen Prozessen (z.B. Fusion, Spallation) Neutronenflüsse erzeugt werden, so dass eine solche Anlage:

a) Plutonium in einem geeigneten Bruttarget erbrüten kann und die Produktionsrate mehr als 100 g Plutonium pro Jahr beträgt⁶⁴ oder

b) von der Organisation IAEO als solche Anlage bestimmt wurde, die bei kontinuierlichem Betrieb eine maximale errechnete Leistung von mehr als 3 MWth besitzt.“

⁶³ Dank an David Moses (*Oak Ridge National Laboratory*) für Diskussion und Vorschläge zur hier vorgelegten Definition.

⁶⁴ Damit wäre auch die Produktion anderer oben genannter kernwaffenrelevanter Materialien (wie Uran-233 und Tritium) mit abgedeckt.

Tabelle 13: Weitere Beschleunigerprojekte (in Auswahl).

Land	Beschleuniger typ	Name	Energie [MeV]	Strom [mA]	Leistung [MW]	Status	Anlagentyp
USA	LINAC	APT	1030	100	103	Fortg. Studie abgebr.	Tritium Pr.
	LINAC	LPSS	800	1,25	1	Studie	SNQ
	LINAC	Linac+HFBR	1000	10	10	Studie	ADS
	LINAC	LANSCE-II	790	1,3-6,3	1-5	Studie	Beschl
	Synchrotron	IPNS-Upgrade	2000	0,5	1	Studie	SNQ
	Synchrotron	PSNS	3600	1,4	5	Studie	SNQ
	LINAC	LANL/MTS	800	1-2	0,8-1,6	Geplant	SNQ
	LINAC	LLNL	500	250	125	Studie	SNQ
	LINAC	LANSCE	800	1	8	In Betrieb	Beschl
	Synchrotron	IPNS ANL	500	0.016	8	In Betrieb	Beschl
	RFQ	LEDA	7	100	7	In Betrieb	Beschl
	Synchrotron	PSNS BNL	3600		5	Studie	SNQ
	Synchrotron	BNL Ph I	24000		1	Studie	Beschl
	Synchrotron	BNL Ph II	24000		4	Studie	Beschl
	LINAC	LANSCE	800	100	8	Studie	Beschl
	Synchrotron	AGS	24000	0.005	0,12	Studie	Beschl
		MTA-Mark1	12	50	0,6	demonstriert	Beschl
		MTA-A-54	0,5	220	0,11	demonstriert	Beschl
		MTA-A-48	3	100	0,3	demonstriert	Beschl
	Synchrotron	Fermilab	16000		4	Studie	
	Synchrotron	Fermilab	8000		0,5	Studie	
Kanada	LINAC	ING	1000	65	65	Studie	SNQ
Schweiz	Cyclotron	PSI Upgrade	590	2	1,18	Studie	SNQ
Europa	LINAC	ESS	1.334	3,75	5	Fortg. Studie	SNQ
England	Synchrotron	RAL	15000	0,27	4	Studie	Beschl
	Synchrotron	RAL	5000	0,8	4	Studie	Beschl
Italien	RFQ	TRASCO	100	30	3	In Bau + gepl.	Beschl
	RFQ+LINAC	TRASCO	1000	10-100	~3,5	Studie	Beschl
Frankreich	LINAC	TRISPAL	600	40	24	Studie	Beschl
	RFQ	IPHI	10	100	1	geplant	Beschl
	RFQ	SILHI	0,95	100	95	In Betrieb	Beschl
Russland		MRTI	1000	3,30, 100-300	3,30, 100-300	Studie	Beschl
	Synchrotron	ANS	10000	0,5	5	Studie	SNQ
	LINAC	MMF INR, RAS	600	0,5	0,3	Geplant	Beschl
Japan	Synchrotron	KENS-II KEK	1000	5	5	Studie	SNQ
		NSP	1500	1-3,2	1,5-5	Studie	SNQ
	Synchrotron	JSNS	3000	0,33	1	In Bau	SNQ
	LINAC	TEF-T J-Parc	600	0,33	0,2	In Bau	SNQ+ADS
	Synchrotron	Kaeri J-Parc-50	50000	0,001	0,05	In Bau	Beschl
	Synchrotron	HIP JAERI	3000	0,33	1	In Bau	Beschl
Korea	RFQ	KOMAC	3	20	0,06	geplant	Beschl
	RFQ	KOMAC	1000	20	20	Studie	Beschl
	RFQ	FMIT	2	40	0,08		Beschl
China	Synchrotron	CSNS	1600	0,062	0,1	Studie	SNQ
Österreich	Synchrotron	AUSTRON	1600	0,3125	0,5	Studie	SNQ
	Synchrotron	AUSTRON II	1600	0,13	0,208	Studie	SNQ
International		IFMIF	40	125x2	10	Studie	Mat. Test
		Energy Amplifier	1000	25-30	25-30	Studie	ADS
		CNSG - Cern	2200	2	4,4	In Bau	Neutrino
		Cern SPL	2200	1,8	4	In Bau	Beschl
		ADONIS	150	2	0,3	Studie	ADS
Firmen	Cyclotron	MYRRHA IBA	350	2-5	1,75	Studie	ADS
	Cyclotron	Cyclotron 30 IBA	30	1,5	0,045	kommerziell	Beschl.
	Cyclotron	IBA	150	1,5	0,225	Studie	Beschl
	LINAC	LANSAR PL-11 AccSys (Comp.)	11	1	0,011	kommerziell	Beschl

6. Literatur⁶⁵

- [Akie 1994] Akie, H.; Muromura, T.; Takano, H.; Matsuura, S.: A New Fuel Material for Once-Through Weapons Plutonium Burning, *Nuclear Technology* 107 (1994), 182–192.
- [Albright 1994] Albright, D.: North Korean Plutonium Production, *Science & Global Security*, 1994, Volume 5, pp.63–87.
- [Albright 1996] Albright, D.; Berkhout, F.; Walker, W.: Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996, World Inventories, Capabilities and Policies, Sipri, Oxford University Press, 1997.
- [Barleon et al. 2004] Barleon, L.; Chauvistré, E.; Daase, C.; von Ehrenstein, D.; Eisenbart, C.; Gmelin, W.; Häckel, E.; Kankeleit, E.; Marauhn, T.; Pistner C.; Ratsch, U.: Wohin mit dem Plutonium? Optionen und Entscheidungskriterien, *Forschungsstätte der evangelischen Studiengemeinschaft e. V., Reihe B Heidelberg*, 2004.
- [Bauer 1981] Bauer, G.S.; Sebening, H.; Vetter, J.-E.; Willax, H.: Realisierungsstudie zur Spallationsneutronenquelle, Jül-Spez-113, KfK 3175, 1981.
- [Bauer 2001] Bauer, G.S.: Physics and Technology of Spallation Neutron Sources. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 463 (2001), S. 505-543.
- [Bauer 2004] Bauer, G.S.: Development of high power targets, *Proceedings of EPAC 2004*, 276-280.
- [Broome 1996] Broome, T.: High power targets for spallation sources, *Proceedings of EPAC 96*, 1996, 267.
- [Bunn et al. 2003] Bunn, M.; Fetter, S.; Holdren, J.; Zwaan, B. v.d.: The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel, Cambridge, Mass.: Project on Managing the Atom, Harvard University, Dec. 2003.
- [Bunn und Wier 2006] Matthew Bunn, Anthony Wier: *Securing the Bomb* 2006. Project Managing the Atom, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard University, July 2006. <<http://www.nti.org/securingthebomb>>.
- [Charpin et al. 2000] Charpin, J.-M., Dessus, B. und Pellat, R.: Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire, *Rapport au Premier Ministre de France*. 2000.
- [Chauvistré und Pistner 2005] Chauvistré, E.; Pistner, C.: Beseitigung von Plutonium. In: Ratsch, U.; Mutz, R.; Schoch, B.; Hauswedell, C.; Weller, C. (Hrsg.): *Friedensgutachten 2005*, LIT Verlag, Münster, S.145-153.
- [Cho 1998] Cho, Y: Reliability and Availability of High Power Proton Accelerators, In: *Utilization and Availability of High Power Proton Accelerators, Workshop Proceedings*, Mito, Japan October, 1998, 227-238, *OECD Report* 2000.
- [Chow 1996] Chow, B. G.: Plutonium Economics and the Civilian Nuclear Future, in Sutcliffe, W. G.: *Selected Papers from Global 95 Concerning Plutonium*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California. UCRL-ID-124105. S. 25–34. 1996
- [CISAC 1994] Committee on International Security and Arms Control (CISAC): *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium*, National Academy of Sciences, National Academy Press, Washington D. C., 1994.

⁶⁵ Literatur mit Erscheinungsdatum bis Ende 2006 wurde für die Druckfassung berücksichtigt. Die Laufzeit des Projektes war von Januar 2003 bis April 2005.

- [CISAC 1995] Committee on International Security and Arms Control (CISAC): Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium. Reactor-Related Options, National Academy of Sciences, National Academy Press, Washington D. C., 1995.
- [Cochran und Paine 1995] Cochran, T. B.; Paine, C. E.: Nuclear Weapons Databook: The Amount of Plutonium and Highly-Enriched Uranium Needed for Pure Fission Nuclear Weapons, Natural Resources Defense Council (NRDC), revised, Washington D.C., 1995.
- [CRS 2001] Rowberg, R.E.: The Department of Energy's Tritium Production Program, Congressional Research Service, RL30425, 2001.
- [Degueldre 2003] Degueldre, C.: Status of the Initiative for Inert Matrix Fuel, Paul Scherrer Institute (PSI). Proceedings of the 9th IMF Workshop, 9–12 September 2003, Kendal, Cumbria, United Kingdom, BNFL.
- [DoE 1996] U.S. Department of Energy: Plutonium: The First 50 Years - United States Plutonium Production, Acquisition, and Utilization from 1944 to 1994. Washington D.C., Februar 1996
- [DoE 2001] DoE Sensitive Subject List (Revised June 2001)
z.B.: <<http://www.llnl.gov/expcon/SSL.pdf>>.
- [DoE 2005] U.S. Department of Energy: Audit Report - Status of the Mixed Oxide Fuel Fabrication Facility. Office of Inspector General, Office of Audit Services, DOE/IG-0713 December 2005.
- [DPG 2000] Deutsche Physikalische Gesellschaft, AKE und AKA: 2000, Symposium Plutonium — und was nun?, in W. Blum (Hrsg.): Energie, Plutonium, Strom und die Umwelt — 17 Vorträge der DPG-Tagungen Heidelberg (1999) und Dresden (2000), Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Bad Honnef.
- [Englert 2004] Englert, M.: Neutronenphysikalische Berechnungen zur Analyse von Nichtverbreitungsaspekten bei Spallationsneutronenquellen. Diplomarbeit, Fachbereich Physik, TU-Darmstadt, 2004.
- [Englert 2005a] Englert, M.: Ein Konzept präventiver Rüstungskontrolle - Fallbeispiel neue Nukleartechnologien (Spallationsneutronenquellen) - AFK Nachwuchskonferenz "Krieg, Gewalt und der prekäre Frieden", Europa-Institut, Bocholt, Januar 2005.
<<http://www.afk-web.de/html/nachwuchstagung.html>>.
- [Englert 2005b] Englert, M.: The Proliferation Risks of Spallation Neutron Sources? International Network of Scientists Against Proliferation, INESAP Information Bulletin, S. 58-62, April 2005.
- [Englert et al. 2006] Englert, M.; Liebert, W.; Pistner, C.: Neutronics Calculations for the Assessment of Proliferation Risks Associated with Spallation Neutron Sources, In: J. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A** 562 Issue 2 (2006), 557-560.
- [Feiveson 1978] Feiveson, H.: Proliferation Resistant Nuclear Fuel Cycles. Ann. Rev. Energy 3 (1978), 357-394.
- [FONAS 2001] Forschungsverbund Naturwissenschaft, Abrüstung und internationale Sicherheit (FONAS) und Wissenschaft und Frieden (Hrsg.): Präventive Rüstungskontrolle, Dossier Nr. 38, Wissenschaft und Frieden, 19. Jg. 2001.

- [FZJ 2000] Inst. f. Sicherheitsforsch. u. Reaktortechn. des Forschungszentrums Jülich (Hrsg.): Workshop „Optionen bei der Verwertung und Entsorgung von Plutonium“, Jülich 13.–14. Januar 2000. Tagungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FZ Jülich, Okt. 2000.
- [Gilinsky et al. 2004] Gilinsky, V.; Miller, M. Hubbard, H.: A Fresh Examination of the Proliferation Dangers of Light Water Reactors, Nonproliferation Policy Education Center, Report, 2004.
<<http://www.npec-web.org/Essays/20041022-GilinskyEtAl-LWR.pdf>>.
- [Hensing und Schulz 1995] Hensing, I. und Schulz, W.: Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Entsorgungspfade von Kernkraftwerken — Eine Kostensimulation alternativer Strategien aus deutscher Sicht, Bd. 45 von Schriften des Energiewirtschaftlichen Instituts, R. Oldenburg Verlag, München. 1995
- [IAEO-INFCIRC 66] IAEA Information Circular 66. The Agency's safeguards.
<<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf66r2.shtml>>.
- [IAEO-INFCIRC 153] IAEA Information Circular 153. Structure and Content of Agreements between the Agency and States required in connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. (Comprehensive Safeguards)
<<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/infcirc153.pdf>>.
- [IAEO-INFCIRC 274] IAEA Information Circular 274. The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material.
<<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/inf274r1.shtml>>.
- [IAEO-INFCIRC 549] IAEA Information Circular 549 from 16. March 1998 Regarding the Management of Plutonium.
<<http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1998/infcirc549.pdf>>.
- [IAEO 2001] IAEA Safeguards Glossary, 2001 Edition, International Nuclear Verification Series No. 3.
<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/nvs-3-cd/PDF/NVS3_prn.pdf>.
- [IMF-10 2006] Papers from the 10th IMF Workshop, Strasbourg, 31. May – 2. June 2005, Journal of Nuclear Materials, Vol. 352, Issue 2, 2006.
- [IPFM 2006] Global Fissile Material Report. First Report of the International Panel on Fissile Materials (IPFM). Program on Science and Global Security, Princeton University, 2006.
<http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/ipfmreport06.pdf>.
- [Kalinowski et al. 2002] Kalinowski, M.; Liebert, W.; Aumann, S.: The German Plutonium Balance, 1968-1999, The Non Proliferation Review, Spring 2002, p. 146-160.
- [Kankeleit 1989] Kankeleit, E., Küppers, C. und Imkeller, U.: 1989, Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium, IANUS-Arbeitsbericht 1/1989, Darmstadt. Translation of german original 1989 by Berkeley Scientific Translation Service: Report on the Usability of Reactor-Plutonium in Weapons. UCRL-TT-112792, Livermore, Januar 1993.

- [Küppers et al. 1999] Küppers, C.; Liebert, W.; Sailer, M.: Realisierbarkeit der Verglasung von Plutonium zusammen mit hochradioaktiven Abfällen sowie der Fertigung von MOX-Lagerstäben zur Direkten Endlagerung als Alternativen zum Einsatz von MOX-Brennelementen, Öko-Institut e. V., Darmstadt. Studie im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, 1999.
- [Liebert 2005] Liebert, W.: Proliferationsresistenz – Risiken und notwendige Schritte zur effektiven Eindämmung der nuklearen Proliferation. In: C. Mölling, G. Neuneck: Die Zukunft der Rüstungskontrolle, Hamburg, 2005, S. 224-235.
- [Liebert et al. 1999] Liebert, W.; Bähr, R.; Glaser, A.; Hahn, L.; Pistner, C.: Fortgeschrittene Nuklearsysteme - Review Study, Schweizerischer Wissenschafts- und Technologierat, TA 34/1999, Bern, April 1999 (156 Seiten).
- [Liebert und Pistner 2001a] Liebert, W.; Pistner, C.: Technische Optionen zur Beseitigung von zivilen Plutoniumbeständen zur Minimierung des Proliferationsrisikos. Wissenschaft und Frieden, 19. Jg, 2001, Dossier (vol. 38), pp. 13-17.
- [Liebert und Pistner 2001b] Liebert, W., Pistner, C.: Disposition of Plutonium Stockpiles. In: XIII International Amaldi Conference on Problems of Global Security (Rome 30 November - 2 Dezember 2000). Atti dei Convegni Lincei 167, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 2001. (Überarbeitete Fassung als IANUS-Arbeitsbericht 4/2001.)
- [Magill und Peerani 1999] Magill, J.; Peerani, P. (Non-) Proliferation Aspects of Accelerator Driven Systems, J. Phys. IV France, vol. 9 (1999), 167-181.
- [Mark 1993] Carson Mark, J.: Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium, Science and Global Security, 1993, Vol. 4, p. 111-128.
- [OECD/NEA: 1994] OECD/NEA: The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Nuclear Energy Agency, Paris. 1994.
- [Oversby 1999] Oversby, V. M., McPheeters, C. C., Degueldre, C. und Paratte, J. M.: 1999, Control of civilian plutonium inventories using burning in a non-fertile fuel, Journal of Nuclear Materials 245(1), 17–26.
- [Pelowitz 2005] Pelowitz, D.B.: MCNPX user's manual, Version 2.5.0. Los Alamos National Laboratory, 2005 (LA-CP-05-0369).
- [Pistner 2006] Pistner, C.: Neutronenphysikalische Untersuchungen zu uranfreien Brennstoffen, Dissertation, Fachbereich Physik und IANUS, TU-Darmstadt, 2006.
- [Pistner und Liebert 2001] Pistner, C.; Liebert, W.: Nukleare Last des Kalten Krieges - Beseitigung von Plutoniumbeständen. In: Physik in unserer Zeit. 32. Jg., Nr. 1, 2001, S. 18-25.
- [Pistner und Liebert 2003] Pistner, C.; Liebert, W.: Parametric study on non-proliferation aspects of IMF, Proceedings of the 9th IMF Workshop, 9.-12. September 2003, Kendal, Cumbria, United Kingdom, BNFL (IANUS-Arbeitsbericht 2/2003).
- [Pistner et al. 2006] Pistner, C.; Liebert, W.; Fujara, F.: Neutronics calculations on the impact of burnable poisons to safety and non-proliferation aspects of inert matrix fuel, J. Nuclear Materials 352 (2006), 268-275.
- [Riendeau et al. 1999] Riendeau, C. D.; Moses, D. L. and Olson, A. P. : Proliferation Potential of Accelerator-Driven Systems: Feasibility Calculations, U.S. Department of Energy, K/NSP-778, 1999
- [Royal Society 1998] The Royal Society: Management of Separated Plutonium. Royal Society, London.

- | | |
|-----------------------|---|
| [Royal Society 2007] | The Royal Society: Strategy Options for the UK's Separated Plutonium. Royal Society, London. |
| [Russell et al. 1995] | Russell, G.R.; Pitcher, E.J.; Daemen, L.L.: Introduction to spallation physics and spallation target design, AIP Conference Proceedings 346, 1995, 93-104. |
| [Spector 1995] | Spector, L. S., McDonough, M. G. und Medeiros, E. S.: Tracking Nuclear Proliferation. A Guide in Maps and Charts, Carnegie Endowment for International Peace, Washington D. C., 1995. |
| [Waters 2002] | Waters, L.S.: MCNPX user's manual, Version 2.3.0. Los Alamos National Laboratory, 2002 (LA-UR-02-2607). |

Über die Autoren:

Dr. phil. nat. Wolfgang Liebert: Studium der Physik und Philosophie in Düsseldorf und Frankfurt a.M.. Physik-Diplom mit einer Arbeit zur theoretischen Plasmaphysik. 1990 Promotion in Theoretischer Physik in Frankfurt a. M. mit einer Arbeit im Bereich der Nichtlinearen Dynamik. Seit 1990 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der TU Darmstadt. Seit 1999 wissenschaftlicher Koordinator und Sprecher von IANUS und Lehrbeauftragter am Institut für Philosophie der TU Darmstadt. Arbeitsschwerpunkte: Nukleare Abrüstung und Nichtverbreitung, Präventive Rüstungskontrolle, Wissenschafts- und Technikfolgenabschätzung, Wissenschaftsphilosophie.

Wolfgang Liebert ist Vorsitzender des Forschungsverbundes Naturwissenschaft, Abrüstung und internationale Sicherheit (FONAS e.V.). Mitbegründer des International Network of Scientists and Engineers Against Proliferation (INESAP). Mitglied in Beiräten und Vorständen wissenschaftlicher NGOs wie der Vereinigung Deutscher Wissenschaftler (VDW) und der Naturwissenschaftler-Initiative für Frieden und Zukunftsfähigkeit.

Matthias Englert: Diplomphysiker. Seit 1999 Mitarbeit bei der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der Technischen Universität Darmstadt. Nach der Diplomarbeit, seit 2004, wissenschaftlicher Mitarbeiter bei IANUS und zeitweise am Fachbereich Physik. Die Hauptarbeitsgebiete betreffen die Umrüstung von Forschungsreaktoren auf nicht waffengrädige Brennstoffe und Untersuchungen zur Proliferationsresistenz von nuklearen Technologien. Eine physikalische Promotionsarbeit zu diesen Themenstellungen wurde im Frühjahr 2009 eingereicht. Matthias Englert ist stellvertretender Sprecher der Arbeitsgruppe Physik und Abrüstung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Dr. rer. nat. Christoph Pistner: Studium der Physik in Darmstadt. Seit 1995 Mitarbeit bei der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der Technischen Universität Darmstadt. Diplomarbeit und Doktorarbeit (2006) zur Frage technischer Optionen zur Beseitigung von Plutoniumbeständen. 1998-2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei IANUS. Seit 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Nukleartechnik und Anlagensicherheit des Öko-Instituts e.V. in Darmstadt. Arbeitsschwerpunkte: Anlagensicherheit und Systemanalysen, nukleare Nichtverbreitung und nuklearer Terrorismus, Technikfolgenabschätzung.